



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Documentation, reconstruction et analyse du comportement du complexe d'incendies de Jasper 2024

Rapport d'information NOR-X-433F

Centre de foresterie du Nord
Service canadien des forêts

2025



Canada

Le Centre de foresterie du Nord est l'un des cinq centres du Service canadien des forêts, qui a son siège social à Ottawa, Ontario. Ce centre s'engage dans la mise en œuvre régionale de projets nationaux.

Le principal objectif du Service canadien des forêts est de mener des recherches en soutien à l'amélioration de l'aménagement forestier afin d'en maximiser les retombées économiques, sociales et environnementales pour tous les Canadiens et Canadiennes.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

**Documentation, reconstruction
et analyse du comportement
du complexe d'incendies
de Jasper 2024**

Rapport d'information NOR-X-433F
Centre de foresterie du Nord
Service canadien des forêts

2025



Canada

Bibliothèque et Archives Canada – Catalogage avant publication

Entrée principale sous le titre : Complexe d'incendies de Jasper 2024 : Documentation, reconstruction et analyse du comportement du feu.

*Also available in English under the title : Jasper Wildfire Complex 2024:
Fire behaviour documentation, reconstruction, and analysis.*

Également publié sur Internet. Le sous-titre varie.

No de catalogue : Fo133-1/433F-PDF

ISBN 978-0-660-78324-6

ISSN : 0831-8247

Rapport d'information publié par le Service canadien des forêts NOR-X-433F. Centre de foresterie du Nord, Edmonton, Alberta.

MOTS CLÉS :

Parc national Jasper, feux de forêt, comportement du feu, gestion des combustibles, tisons.

L'information contenue dans cette publication est offerte en libre accès en vertu de la Licence du gouvernement ouvert – Canada, version 2.0. Vous êtes encouragés à utiliser les données et l'information disponibles en vertu de cette licence sous réserve de quelques conditions seulement. Pour de plus amples renseignements, veuillez consulter la Licence du gouvernement ouvert disponible à l'adresse suivante : <https://ouvert.canada.ca/fr/licence-du-gouvernement-ouvert-canada>.

Photo de couverture : L'incendie South Fire de Jasper dans la soirée du 23 juillet 2024, alors qu'il avançait vers le nord dans la vallée des Cinq Lacs et vers le mont Tekarra, arrière-plan de gauche (Photo gracieuseté de Parcs Canada, © 2024).

© Sa Majesté le roi du chef du Canada, représenté par le ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2025

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

Les informations contenues dans cette publication ou ce produit peuvent être reproduites, en partie ou en totalité, et par tout moyen, à des fins personnelles ou publiques non commerciales, sans frais ni permission supplémentaire, sauf indication contraire.

Vous êtes demandés de :

- faire preuve de diligence raisonnable pour garantir l'exactitude des documents reproduits;
- d'indiquer le titre complet des documents reproduits, et le nom de l'organisme auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'une œuvre officielle publiée par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été produite en affiliation avec ou avec l'approbation de RNCAN.

La reproduction commerciale et la distribution sont interdites sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à copyright.droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.



Papier recyclé

Table des matières

Préface	1
Citation	1
Remerciements.....	2
Résumé	3
Abstract	4
Sommaire	5
Contexte.....	5
Principaux facteurs contributifs	5
Conclusions et répercussions sur la gestion	6
1. Introduction	7
1.1 Aperçu et contexte.....	7
1.2 Objectifs liés au comportement et à l'environnement d'incendie	9
1.3 Structure et portée du rapport	9
2. Complexe combustible et conditions du combustible	12
2.1 Historique des incendies et dynamique des combustibles de la vallée de la haute Athabasca	12
2.2 Étendue et gravité des attaques du dendroctone du pin ponderosa	13
2.3 Végétation et complexe combustible.....	14
2.4 Opérations de réduction des risques d'incendie	16
3. Conditions météorologiques propices aux incendies	18
3.1 Conditions précédant le feu	18
3.2 Conditions pendant la période de combustion	21
4. Chronologie du développement de l'incendie	26
4.1 Allumage de l'incendie : 22 juillet, 19 h 5	26
4.2 Intervalle 1 : Du 22 juillet à 19 h 5 au 23 juillet à 6 h 6 (0–11 h)	26
4.3 Intervalle 2 : 23 juillet, de 6 h à 14 h (11 à 19 h).....	31
4.4 Intervalle 3 : Du 23 juillet à 14 h au 24 juillet à 6 h (19 à 35 h).....	33
4.5 Intervalle 4 : Le 24 juillet, 14 h (35 à 43 h)	34
4.6 Intervalle 5 : Le 24 juillet, 14 h, 14 h à 23 h (43 à 52 h)	37
5. Sévérité et analyse du comportement de l'incendie	47
5.1 Sévérité d'incendie.....	47
5.2 Analyse de terrain du comportement d'incendie.....	49
5.3 Intensité de l'incendie du front	58
5.4 Comparaison de la vitesse de propagation	59
6. Résumé et conclusions	62
6.1 Facteurs clés contribuant à l'activité d'incendie observée.....	62
6.2 Interprétations et répercussions pour gestionnaires	63
Annexe A – Méthodologie	72
A1. Estimation du séchage de la couverture forestière supplémentaire dû à la perte de couverture causée par le DPP	72
A2. Analyse de la progression d'incendie	72
A3. Cartographie de la sévérité d'incendie.....	74
A4. Échantillonnage et calcul de la consommation de combustible.....	75

Annexe B – Renseignements supplémentaires	76
B1. Types de carburant de la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies forêt (PCI) ..	76
B2. Climatologie de la foudre	78
B3. Stabilité atmosphérique	81
B4. Cartes modélisées du vent	82
B5. Autres observations de la station météorologique de surface	84
B6. Observation de la terre par satellite du complexe d'incendies de Jasper	86
B7. Carte détaillée des opérations d'allumage	94
B8. Comportement des incendies de forêt antérieurs dans l'est de la cordillère	95
B9. Production des tisons et caractéristiques du transport	99
B10. Reconstruction des vents extrêmes au sein de la colonne de convection d'incendie	101
B11. Liste des abréviations	103

Liste des figures

Figure 1. Carte d'ensemble du Complexe d'incendies de Jasper.	8
Figure 2. Répartition annuelle des attaques du dendroctone du pin ponderosa dans le périmètre de l'incendie au sud de Jasper (2 août).	13
Figure 3. Type de couverture végétale avant l'incendie dans le complexe d'incendies de Jasper basé sur les espèces classifiées de l'étage dominant et la mortalité, selon les attributs de l'Inventaire des ressources végétales	15
Figure 4. Structure des combustibles dans la vallée de la haute Athabasca	16
Figure 5. Conditions météorologiques de 2024 comparées à la climatologie	19
Figure 6. A) Hauteur géopotentielle à 500 mbar et B) Anomalies du taux de précipitation quotidien pour les 22 jours précédant l'allumage	20
Figure 7. Observations météorologiques de surface horaires aux stations météorologiques de Ranger Creek (en haut) et poste de garde de Jasper (en bas) du 22 au 24 juillet 2024	23
Figure 8. Observations météorologiques de surface horaires aux stations météorologiques de Dorothy et Paradise (Marmot Basin) du 22 au 24 juillet 2024	24
Figure 9. Profils de vent modélisés par le système à haute résolution de prévision déterministe près du front de l'incendie	25
Figure 10. Photos de l'activité d'incendie peu après l'allumage	29
Figure 11. Carte de progression de l'incendie du 22 juillet à 19 h 5 au 23 juillet à 6 h (intervalle 1)	30
Figure 12. Comportement de l'incendie le 23 juillet	31
Figure 13. Progression d'incendie le 23 juillet à 14 h au 23 juillet à 14 h (intervalle 2)	32
Figure 14. Comportement d'incendie à l'intervalle 3	34
Figure 15. Comportement de l'incendie à l'intervalle	35
Figure 16. Intervalles 3 et 4 : progression de l'incendie du 23 juillet à 14 h au 24 juillet à 14 h	36

Figure 17. Comportement de l'incendie entraîné par le panache, intervalle 5.1 le 24 juillet	38
Figure 18. Comportement de l'incendie et effets pendant l'intervalle 5.1 le 24 juillet (suite)	39
Figure 19. Intervalle 5.1 : carte de progression du feu le 24 juillet	40
Figure 20. Intervalle 5.2 : carte de progression d'incendie le 24 juillet.	42
Figure 21. Comportement d'incendie pour l'intervalle 5.3.....	44
Figure 22. Carte de progression finale, intervalles 5.2 et 5.3 : Le 24 juillet de 17 h à 23h00.....	45
Figure 23. Carte de progression complète des intervalles 1 à 5	46
Figure 24. Cartographie de la sévérité des incendies pour les feux de forêt de Jasper avec les emplacements des parcelles de consommation de combustible	48
Figure 25. Traitements de réduction des risques et parcelles d'évaluation rapide	51
Figure 26. Distribution de la fraction brûlée de cime (%) selon les types de traitement dans le milieu périurbain du lotissement urbain de Jasper.....	52
Figure 27. Distribution de la hauteur moyenne de carbonisation (m) entre les types de traitement dans le milieu périurbain du lotissement urbain de Jasper	52
Figure 28. Exemple de photo de parcelle montrant une consommation extrême du combustible (parcelle JP11).....	53
Figure 29. Cartes à fine échelle des parcelles de consommation de combustible superposées à la carte de sévérité des incendies	56
Figure 30. Exemples de peuplements traités avec des combustibles brûlés illustrant un gradient de sévérité du feu et de mortalité des arbres	57
Figure 31. Exemple de comportement d'incendie de surface de haute intensité dans un peuplement de peupliers faux-trembles continu près du ruisseau Whistlers	59
Figure 32. Vitesses de propagation observée le 24 juillet (observations de Jasper en 2024) comparées au système PCI [11] et aux autres modèles de vitesse de propagation	61

Liste des tableaux

Tableau 1. Type de peuplement et classe de mortalité causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) à l'intérieur du périmètre du complexe d'incendies de Jasper avant l'incendie	14
Tableau 2. Valeurs IFM standard des trois stations météorologiques à proximité immédiatement avant et pendant la période principale de combustion du complexe d'incendies de Jasper, du 21 au 24 juillet 2024	22
Tableau 3. Résumé des intervalles de progression de l'incendie au sud de Jasper pendant la période du 22 au 24 juillet 2024	27
Tableau 4. Météo horaire et valeurs de la méthode de l'IFM ^a de la station Ranger Creek pendant l'intervalle 1, du 22 au 23 juillet 2024	28
Tableau 5. Distribution des classes de sévérité du feu par intervalle chronologique au sein du périmètre d'incendie cartographié pour le complexe d'incendies de Jasper, 2024	49
Tableau 6. Consommation de carburant, réduction de la densité, et type global de comportement du feu et classe de gravité à partir de 11 parcelles de combustible détaillées.....	54
Tableau 7. Intensité du front estimée du complexe d'incendies de Jasper pendant l'après-midi du 24 juillet	59

Préface

Ce rapport sur le comportement du complexe d'incendies de Jasper a été réalisé en reconnaissant pleinement que les impacts des feux de végétation vont bien au-delà des données, des modèles et de la compréhension scientifiques. Les feux transforment non seulement le paysage, mais aussi la vie des gens qu'ils touchent. Nous comprenons que de nombreuses personnes dans la collectivité de Jasper et au-delà ont été profondément touchées par cet incendie.

Les premiers intervenants et le personnel de soutien de nombreuses communautés et agences se sont réunis dans des circonstances extrêmement difficiles pour protéger les vies, les foyers et les moyens de subsistance des habitants de Jasper et des visiteurs du parc national Jasper.

Nous honorons tout particulièrement la mémoire du pompier de l'Alberta Morgan Kitchen, sa famille et tous les membres de la base de lutte contre les feux de forêt Alberta Wildfire de Rocky Mountain House. Morgan est décédé le 3 août 2024, lors des opérations de lutte contre l'incendie South Fire de Jasper. Son sacrifice et sa vie au service des autres resteront toujours gravés dans nos mémoires.



Morgan Kitchen 2000-2024

C'est avec un profond respect pour toutes les personnes touchées que nous présentons ce rapport; leurs expériences et leur vécu nourrissent nos efforts continus pour mieux comprendre le comportement du feu.

Citation

Équipe de travail sur la documentation, la reconstruction et l'analyse de l'incendie de Jasper 2025. Complexe d'incendies de Jasper 2024 : Documentation, reconstruction et analyse du comportement du feu. Rapport d'information du Centre de foresterie du Nord NOR-X-433F, Ressources naturelles Canada, Edmonton, AB.

Les membres de l'équipe de documentation, de reconstruction et d'analyse de l'incendie de Jasper sont les suivants :

Déploiement sur le terrain :

Stefana Dranga, Geoff Goetz, Ginny Marshall, Brett Moore, Daniel Perrakis, Steve Taylor, Dan Thompson

Analyse et rédaction techniques :

Matthew Ansell, Luke Collins, Mark de Jong, Rachel Dietrich, Stefana Dranga, Geoff Goetz, Ginny Marshall, Brett Moore, Daniel Perrakis, Steve Taylor, Dan Thompson, Derek Van Der Kamp.

Remerciements

De nombreuses personnes et organisations ont aidé à faciliter le travail sur le terrain et/ou à fournir des données et d'autres documents qui ont contribué à la réalisation de ce rapport. Nous remercions Al Westhaver (retraité), Landon Shepherd, Scott Murphy, Gregg Walker, Elyse Reynolds et Kris Johnson de Parcs Canada; Greg Van Tighem de la municipalité de Jasper; Jonathan Boucher, Jean Marchal, Natalie Maslowski, Richard Carr et Sam Lacarte de Ressources naturelles Canada; Tanya Letcher du ministère des Forêts et des Parcs de l'Alberta; Brandon MacKinnon du groupe FPInnovations – Incendies de forêt; Delia Mo et Enoch Leisure de MoLeisureXVentures; divers membres du personnel de Marmot Basin et du Jasper Park Lodge; et Laura Chasmer, Tristan Skretting et Emily Jones à l'Université de Lethbridge, Département de géographie et d'environnement. Nous remercions également Marty Alexander, Kelvin Hirsch et Ian Pengelly pour leurs examens réfléchis d'une version antérieure de ce rapport.



Résumé

À la suite d'un incendie très destructeur en 2024 à Jasper, en Alberta, une étude a été réalisée pour décrire le comportement et les facteurs environnementaux associés à cet événement. Le 22 juillet 2024, la foudre a déclenché plusieurs allumages dans la vallée de la haute Athabasca dans le parc national Jasper après un mois de sécheresse. Trois incendies ont fusionné en un seul, nommé « South Fire », qui a avancé rapidement vers le lotissement urbain de Jasper. Un incident séparé plus proche de la collectivité a initialement attiré le plus d'attention et de suppression de la plupart des ressources.

Une activité de feu de cime a été observée moins de dix minutes après l'allumage du South Fire, indiquant qu'aucune suppression efficace n'était possible. Au cours des 50 prochaines heures, l'incendie South Fire a présenté un comportement de feu sévère à extrême pendant la plupart des heures de la journée malgré des vitesses de vent faibles en surface. Une consommation de combustible très élevée a été mesurée dans les parcelles de recherche, en partie en raison des effets de la mortalité causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) sept ans plus tôt. La dynamique de l'incendie dirigée par la colonne de convection était claire, y compris des vents générés par les incendies dont la force était comparable à celle d'une tornade. L'après-midi du 24 juillet, l'incendie a atteint un terrain escarpé près de la confluence des rivières Athabasca et Miette. Un effondrement présumé de la colonne de convection s'est produit lorsque l'incendie a atteint la limite des arbres et a rencontré des vents transversaux dans la vallée, projetant de la fumée et des tisons vers le nord-est en direction du lotissement urbain de Jasper. Les premières structures ont pris feu peu après, et l'incendie a éventuellement détruit 358 structures. Les opérations de réduction des risques ont réussi à diminuer l'implication des cimes, en particulier les opérations mises en œuvre moins de 10 ans avant l'incendie.

Ce rapport intègre des entretiens opérationnels et des photographies, des mesures prises sur le terrain, des registres de gestion ainsi que des modélisations afin de reconstruire la séquence des événements et éléments ayant mené à cet incident. Parmi les facteurs contributifs clés figurent les conditions de sécheresse, l'allumage et l'accélération rapides de l'incendie, les combustibles toujours présents et affectés par le DPP, une intensité élevée soutenue, un comportement dirigé par la colonne de convection, l'effondrement de la colonne de convection et le transport de tisons. Le complexe d'incendies de Jasper 2024 illustre le défi croissant de la gestion des événements de feux de végétation extrêmes dans le paysage incendiaire en évolution du Canada. En documentant et en analysant cet événement, ce rapport fournit des renseignements sur la nécessité d'avoir une meilleure compréhension des événements et de leurs modèles prédictifs, ainsi que de renforcer la résilience du paysage et des communautés face aux futures menaces d'incendies.

Abstract

Following a highly destructive 2024 wildfire in Jasper, Alberta, a study was completed to describe the behaviour and environmental factors associated with this event. On July 22, 2024, lightning ignited multiple fire starts in the upper Athabasca valley in Jasper National Park following a month-long drought. Three ignitions merged as the South Fire and advanced rapidly toward the Jasper townsite. A separate incident closer to the community initially drew most attention and suppression resources.

Crown fire activity on the South Fire was observed within less than 10 minutes of ignition, indicating that there was no opportunity for effective suppression. Over the next 50 hours, the South Fire exhibited severe to extreme fire behaviour during most daytime hours despite low surface wind speeds. Very high fuel consumption was measured in research plots, partly due to the effects of mountain pine beetle (MPB)–driven mortality 7 years earlier. Plume-driven fire dynamics were evident, including tornado-force fire-generated winds. On the afternoon of July 24, the fire reached steep terrain near the confluence of the Athabasca and Miette rivers. A suspected convection column collapse event occurred as the fire reached treeline and encountered cross-valley winds, sending smoke and embers to the northeast toward the Jasper townsite. The first structures ignited shortly afterward, and the fire ultimately destroyed 358 structures. Hazard reduction treatments successfully reduced crown involvement, particularly treatments implemented less than 10 years before the fire.

This report integrates operational interviews and photographs, field measurements, management records, and modelling to reconstruct the sequence and drivers behind this event. Key contributing factors include drought conditions, rapid ignition and acceleration, continuous and MPB-affected fuels, sustained high intensity, plume-driven behaviour, convection column collapse, and ember transport. The 2024 Jasper Wildfire Complex illustrates the increasing challenge of managing extreme wildland fire events in Canada's evolving fire landscape. By documenting and analyzing this event, this report provides insights into the need for improved understanding and predictive models and to enhance landscape and community resilience to future wildfire threats.

Sommaire

Contexte

Le soir du 22 juillet 2024, trois coups de foudre ont déclenché des incendies dans la vallée de l'Athabasca au sein du parc national Jasper, à 23 km au sud de la collectivité de Jasper en Alberta. Ces incendies se sont rapidement intensifiés et ont fusionné en un seul incendie « South Fire », produisant une colonne de fumée visible depuis Jasper en moins d'une heure. Simultanément, un quatrième allumage a été détecté à environ 7 km à l'est du lotissement urbain de Jasper, et est rapidement devenu le North Fire, attirant la plupart de l'attention et des ressources de suppression en raison de sa proximité de la communauté. L'accélération rapide et le développement de ces incendies, en particulier du South Fire, ont entraîné un ordre d'évacuation pour le lotissement urbain de Jasper et l'ensemble du parc national Jasper cette nuit-là.

Au cours des quelque 50 heures suivantes, l'incendie South Fire a rapidement progressé vers le nord en direction de Jasper. Un comportement d'incendie de forêt persistant, sévère à extrême, a rendu les efforts de suppression directs impossibles. Le comportement du feu était le plus intense lorsqu'il était influencé par des vents forts et en rafales, mais restait actif même lorsque les vents de surface étaient légers. L'incendie a atteint le lotissement urbain de Jasper dans l'après-midi du 24 juillet lors de l'événement de propagation le plus rapide, suite à un effondrement de colonne alors que l'incendie montait des pentes abruptes près de la confluence des vallées de Miette et d'Athabasca. Cet événement a généré de forts vents de surface, de la fumée et des tisons qui ont dévalé la pente en direction du lotissement urbain; les premières structures se sont enflammées peu après. Les mesures de protection de la structure ont permis aux pompiers de protéger deux tiers du lotissement urbain et toutes les infrastructures essentielles. Un total de 358 structures ont été détruites, avec des dommages estimés marquant cela comme l'un des incendies de forêt les plus destructeurs de l'histoire moderne du Canada.

Ce rapport présente les conclusions d'un examen scientifique du complexe d'incendies de Jasper 2024 commandé par Parcs Canada et mené par le Service canadien des forêts (SCF) de Ressources naturelles Canada pour analyser les facteurs physiques et écologiques qui ont influencé le complexe d'incendies de Jasper 2024 et ont conduit à la destruction du lotissement urbain de Jasper. Le travail a incorporé une combinaison d'observations de terrain, de données documentaires du personnel de la gestion des incendies, ainsi qu'un effort de modélisation et d'analyse multidimensionnel.

Principaux facteurs contributifs

1. Sécheresse : Le manque de précipitations et une vague de chaleur dans le mois précédant l'incendie ont considérablement réduit l'humidité du combustible, rendant presque tous les combustibles de surface susceptibles pour la combustion. Ce niveau d'aridité a augmenté la vitesse de propagation et l'intensité de l'incendie.

2. Combustibles continus et tués par le dendroctone : Une forêt de conifères mature ininterrompue a créé un corridor aligné sur les vents, favorisant la propagation d'incendie dans la vallée de la haute Athabasca. La mortalité des arbres causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) a modifié la structure et la disponibilité du complexe des combustibles. La perte de feuillage a entraîné un dessèchement accéléré des combustibles de surface, et la mortalité des arbres a conduit à une abondance de combustibles ligneux secs, augmentant considérablement la consommation de combustibles et l'intensité de l'incendie.

3. Allumage et accélération rapides : Trois incendies de forêt ont été déclenchés simultanément par la foudre à 23 km au sud de Jasper dans la soirée du 22 juillet. Des vents convectifs puissants et des combustibles secs ont facilité la propagation rapide d'incendie. Un comportement d'incendie de cime à haute intensité s'est développé en quelques minutes, dépassant la capacité des ressources d'attaque initiales. En quelques heures, les incendies s'étaient fusionnés et avaient dépassé 3 500 ha en superficie.

4. Intensité et développement de l'incendie soutenus : L'incendie s'est propagé régulièrement dans la vallée de la rivière Athabasca au cours de 50 heures, avec plusieurs périodes prolongées de comportement d'incendie intense. Des brûlages importants ont persisté toute la nuit en raison de graves sécheresses et de conditions de combustibles.

5. Comportement d'incendie commandé par le panache : Une consommation élevée de combustibles, des vents de surface modérés et des pentes abruptes ont favorisé des colonnes de convection imposantes avec de forts courants ascendants. Les vitesses du vent générées par l'incendie près de la colonne principale sont estimées avoir atteint jusqu'à 200 km/h. Les vents ambiants à l'extérieur de la zone active des incendies sont restés légers à modérés.

6. Effondrement de la colonne et transport de tisons : Une puissante colonne de convection a persisté alors que l'incendie se propageait sur des pentes abruptes à l'ouest de Jasper jusqu'à ce qu'elle s'effondre près de la

limite des arbres et à la jonction des vallées d'Athabasca et de Miette. L'effondrement de la colonne a probablement propagé des tisons à plus de 2 km dans des combustibles réceptifs dans et près du lotissement urbain de Jasper, déclenchant des foyers secondaires et ayant éventuellement mené à l'incendie urbain. Cependant, l'origine précise des tisons déclencheurs de structure reste incertaine.

7. Opérations de réduction des risques d'incendie :

Les opérations de réduction des risques autour de Jasper, mis en œuvre depuis 2003, ont modéré le comportement d'incendie dans les zones de combustible entourant le lotissement urbain. Dans les zones traitées, l'implication de la cime, la consommation de combustibles et l'intensité de l'incendie estimée étaient plus faibles. Cela a réduit la production de tisons et limité l'exposition des structures avoisinantes à l'allumage dû à l'activité du feu de cime à proximité; les opérations ont également réduit l'exposition des pompiers aux niveaux extrêmes d'intensité des incendies dans le lotissement urbain.

8. Vents de montagne complexes : Bien que des rafales aient été observées par intermittence aux stations situées sur les crêtes et en haute altitude, les vitesses du vent de surface au fond de la vallée sont restées relativement faibles, selon les mesures des capteurs de vent standards. Cela rend cet événement quelque peu unique parmi les catastrophes d'incendies survenues récemment. Les influences atmosphériques telles que la convection induite par l'incendie et les profils de vent verticaux complexes ont pu jouer un rôle significatif dans l'accélération de la propagation d'incendie, mais elles sont difficiles à observer et à intégrer dans les modèles de prévision.

Conclusions et répercussions sur la gestion

Ce rapport documente l'incendie South Fire de Jasper en 2024 comme une étude de cas d'un événement complexe d'incendie de forêt associé à des pertes majeures. Plusieurs considérations de gestion ont émergé de cette analyse.

Danger accru : Plus d'un siècle d'exclusion de feux dans la vallée de la haute Athabasca a transformé le paysage,

passant d'un mélange de forêts ouvertes et fermées à une structure plus uniforme, plus propice au feu, et plus susceptible d'avoir des problèmes de santé des forêts, ce qui augmente le potentiel d'avoir des incendies de grande ampleur et incontrôlables.

Développement rapide et contraintes à l'intervention :

Bien que la plupart des incendies de forêt soient maîtrisés rapidement, l'incendie South Fire de Jasper illustre comment la détérioration rapide des conditions peut dépasser la capacité d'intervention. Le succès dans la limitation des pertes dépendait de la reconnaissance précoce du potentiel extrême d'incendie, ce qui a permis une évacuation en temps opportun.

Intensité extrême et dynamique du panache : Des interactions météorologiques complexes ont causé des rafales descendantes qui ont propagé des tisons dans Jasper, mettant en évidence des lacunes dans les prévisions actuelles de tels événements.

Renforcement de la résilience de la communauté :

Une séquence commune de facteurs est à l'origine des catastrophes liées aux incendies de forêt : un potentiel d'incendie élevé, des conditions de combustion extrêmes, de multiples allumages dans les collectivités et un comportement d'incendie en développement rapide dépassant les ressources de lutte contre les incendies. Le renforcement de la résilience exige une approche intégrée qui comprend l'évaluation et la gestion des risques liés au paysage, l'amélioration de la résistance aux incendies dans l'environnement bâti, et une planification préventive efficace.

L'incendie South Fire de Jasper illustre le défi croissant de la gestion des événements d'incendie de forêt extrêmes dans le paysage incendiaire en évolution du Canada. En documentant et en analysant cet événement, ce rapport fournit des renseignements pour améliorer les modèles prédictifs, affiner les stratégies de gestion des incendies et renforcer la résilience face aux futures menaces d'incendies de forêt.

1. Introduction

1.1 Aperçu et contexte

Le 22 juillet 2024, quatre allumages distincts ont été détectés dans la vallée supérieure de la rivière Athabasca dans le parc national Jasper en Alberta. Trois d'entre eux étaient causés par la foudre et se sont fusionnés en quelques minutes pour former l'incendie au sud de Jasper, qui s'est étendu sur 23 km vers le nord dans la vallée au cours des deux jours suivants et dans la municipalité de Jasper (**Figure 1**). Le soir où les incendies ont été découverts, environ 25 000 personnes ont été évacuées de la région et 358 structures ont éventuellement été détruites.

Les estimations initiales des pertes économiques placent le complexe d'incendies de Jasper 2024 au deuxième rang des incendies de forêt les plus destructeurs de l'histoire moderne du Canada, dépassé seulement par l'incendie de la rivière Horse en 2016 à Fort McMurray en Alberta [1]. Cet événement a suivi la saison des feux de végétation sans précédent de 2023, qui a battu plusieurs records canadiens au niveau de la superficie brûlée, le nombre de grands incendies, le nombre de personnes évacuées et d'émissions de carbone [2]. La saison des incendies de 2024 a commencé plus lentement, mais à la fin juillet, une vague de chaleur et un manque de

précipitations ont créé des conditions de dessèchement profond et des niveaux de danger d'incendie élevés dans le parc national Jasper et les zones environnantes.

Le 29 juillet 2024, suite à l'évaluation initiale des dommages, Parcs Canada a demandé l'aide du Service canadien des forêts (SCF) de Ressources naturelles Canada (RNC) pour documenter le comportement d'incendie dans le complexe d'incendies de Jasper. L'unité des Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt (Wildfire Intelligence and Predictive Services [WIPS]) du SCF (**Encadré 1**) a rapidement mis sur pied une équipe de travail pour la documentation, la reconstruction et l'analyse (Documentation, Reconstruction, and Analysis Task Team [DRATT]) composée de chercheurs et d'analystes ayant une expertise dans le comportement du feu et les opérations de lutte contre les incendies de forêt. L'équipe a été déployée à Jasper au début d'août pour commencer une reconstruction du comportement d'incendie associé à ces événements alors que l'incendie était encore actif et que la plupart des membres du personnel associé à l'étude de la propagation initiale d'incendie et à l'impact sur la collectivité étaient encore présents.

Encadré 1. L'unité des Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt du Service canadien des forêts

En 2023, le Service canadien des forêts a établi l'unité des Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt (WIPS). Bien que le SCF ne soit pas un gestionnaire de terres ni un principal organisme d'intervention en cas d'incendie, l'unité des Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt a été créée pour coordonner et formaliser les ressources scientifiques de gestion des incendies que le SCF a historiquement fournies de manière ad hoc aux organismes canadiens de gestion des incendies. L'unité des Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt se concentre sur le développement et le maintien des systèmes d'information avancés sur les incendies et des systèmes de modélisation, et offre un soutien opérationnel tel que la détection et la prédiction des incendies de forêt ainsi que l'analyse du comportement d'incendie. L'unité fournit également un soutien technique au Centre interservices des feux de forêt du Canada (CIFFC), facilitant la planification opérationnelle et le partage des ressources.

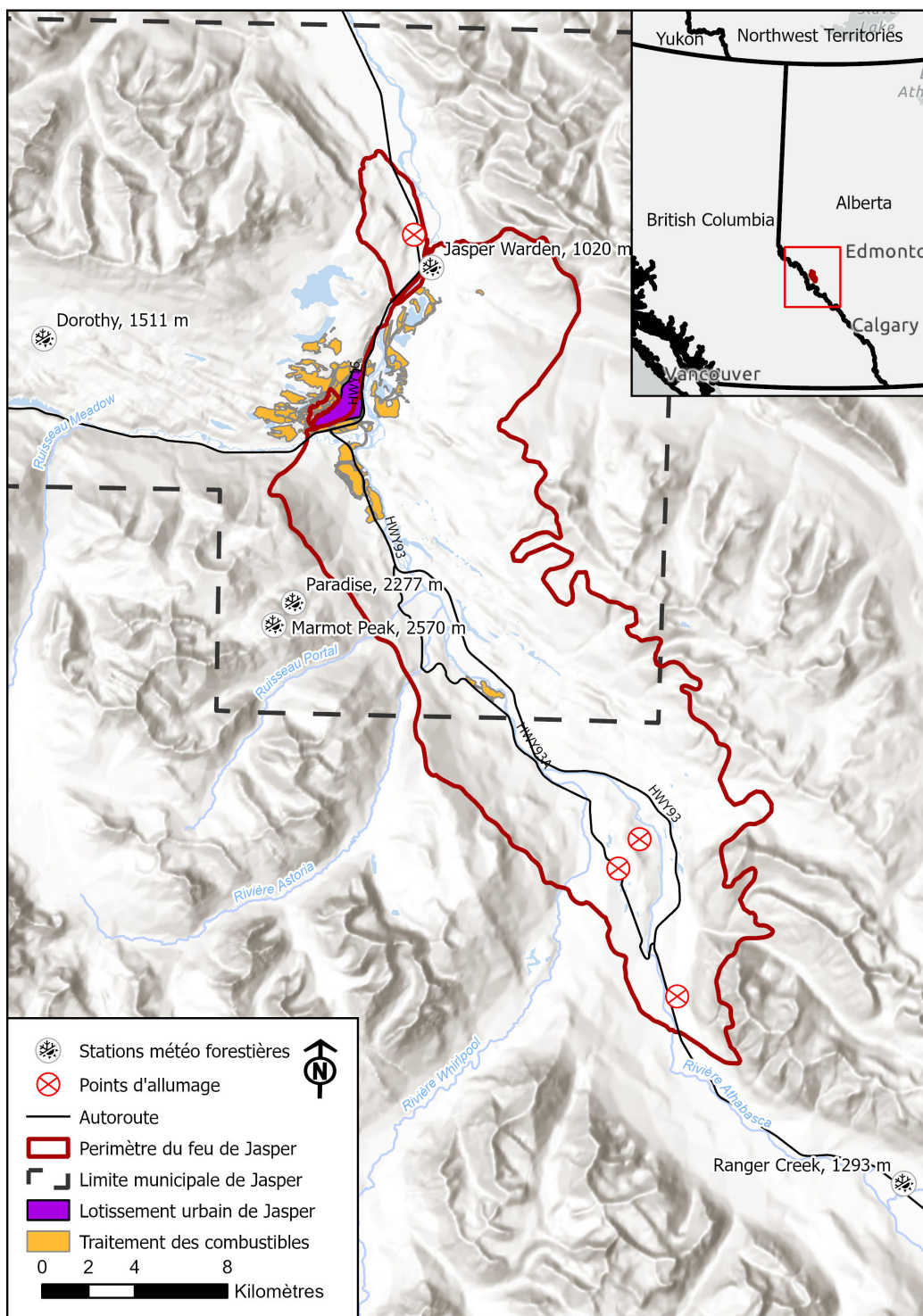


Figure 1. Carte d'ensemble du complexe d'incendies de Jasper. Le périmètre montre l'étendue combinée des incendies South Fire et North Fire au 2 août 2024 (les incendies ayant fusionné le 24 juillet 2024). Le lotissement urbain, les stations météorologiques clés, et l'étendue des traitements de réduction des risques sont indiqués.

1.2 Objectifs liés au comportement et à l'environnement d'incendie

Les objectifs de la DRATT pour le complexe d'incendies de Jasper étaient les suivants :

1. **Identifier les allumages et les facteurs de propagation** : Analyser les facteurs environnementaux et situationnels contribuant à l'allumage, à l'accélération et à la propagation de l'incendie jusqu'à ce qu'il atteigne le lotissement urbain de Jasper le 24 juillet 2024.
2. **Documenter les éléments de preuve liés au comportement d'incendie** : Assembler et analyser les preuves photographiques et vidéo recueillies par le personnel de gestion des incendies, en plus des images satellites afin de cartographier les tendances et la direction de la propagation de l'incendie.
3. **Examiner les répercussions liées aux combustibles** : Étudier le rôle de la mortalité des arbres causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) et des opérations mécaniques de réduction des risques liés aux combustibles dans l'influence exercée sur le comportement d'incendie.
4. **Analyser les configurations du vent** : Étudier la vitesse et la direction du vent en utilisant les données des stations météorologiques, la réanalyse et les produits de modélisation, y compris les profils de vent avec altitude.
5. **Identifier les phénomènes extrêmes liés aux incendies** : Documenter les indications de comportement d'incendie extrême, y compris des vents induits par l'incendie, des tourbillons d'incendie, des pyrocumulonimbus et la répansion de tisons à longue distance.
6. **Reconstruire le comportement du feu près du lotissement urbain** : Fournir un compte rendu détaillé du comportement d'incendie à mesure que l'incendie s'est approché du lotissement urbain de Jasper le 24 juillet 2024.

1.3 Structure et portée du rapport

La reconstruction et l'analyse sont basées sur la documentation recueillie après que la majorité de la zone ait brûlée et que des dommages ont eu lieu, y compris :

1. Des entretiens avec le personnel de lutte contre l'incendie présent lors des événements critiques du 22 au 24 juillet 2024 : Des renseignements ont été demandés concernant les délais de gestion des incendies, y compris les évacuations, les opérations aériennes, les efforts de suppression et les observations

personnelles des phénomènes météorologiques et des phénomènes liés aux incendies, y compris la fumée, les inversions atmosphériques et les turbulences. Environ 8 700 fichiers de photos et vidéos ont été acquis pour analyse

2. Des observations sur le terrain liées à la consommation de combustible, à la direction de la propagation, à la participation du couvert forestier et à l'échantillonnage des tisons ont été menées du 1^{er} au 14 août 2024
3. L'analyse des ensembles de données sur la végétation et le climat a été fournie par Parcs Canada
4. Des renseignements ont été acquis auprès de chercheurs universitaires et de dépôts de données publics.

La structure du rapport est comme suit :

Section 2. Complexes combustibles et conditions des combustibles décrivent les types de combustibles présents dans la vallée de la rivière Athabasca, l'impact de l'épidémie de DPP de 2013 à 2020 sur les conditions des combustibles, et les opérations mécaniques de réduction des risques d'incendie qui ont été effectuées de 2003 à 2022 pour faire face aux risques liés aux combustibles.

Section 3. Conditions météorologiques propices aux feux décrit les conditions météorologiques antérieures menant à l'incendie et fournit un aperçu des conditions météorologiques propices aux feux pendant l'événement principal de propagation de l'incendie.

Section 4. Chronologie du développement du complexe d'incendies documente en détails les conditions météorologiques, la propagation et le comportement du complexe d'incendies en cinq intervalles de demi-journée pendant la période critique de 50 heures, en se basant principalement sur l'analyse des données des stations météorologiques, les preuves photographiques et les images satellites.

Section 5. Analyses de la sévérité et du comportement d'incendie présentent les résultats de plusieurs analyses détaillées : une analyse de la sévérité de l'incendie à partir d'images satellite, des mesures de la consommation de combustibles ainsi qu'une discussion sur les caractéristiques globales du comportement d'incendie calculé.

Section 6. Résumé et conclusions rassemblent les constatations et les éléments de preuve pour résumer les processus de comportement du feu les plus probables et associés à l'incident. Les principales constatations et interprétations pertinentes pour les responsables de la gestion des incendies sont également fournies dans cette section.

Une section complète des annexes comprend l'**annexe A – Méthodologie** qui contient des méthodes détaillées liées aux analyses. Des informations supplémentaires liés à la reconstruction se trouvent dans l'**annexe B – Informations supplémentaires**.

Bien que l'incendie North Fire soit mentionné, il n'est pas le sujet principal de ce rapport. Il a rapidement été établi que l'incendie South Fire était l'événement qui a finalement affecté le lotissement urbain de Jasper et causé la majorité des dommages. Dans ce document, les références à « l'incendie » désignent le South Fire, sauf indication contraire.

Une analyse des dommages structurels, des efforts d'évacuation et des tactiques de gestion des incendies était au-delà du champ d'application de ce rapport. Séparément, le groupe FPInnovations - Incendies de forêt (<https://wildfire.fpinnovations.ca/fr/>) a examiné le comportement d'incendie dans la zone d'interface entre les rivières Athabasca et Miette et le lotissement urbain de Jasper ainsi que les pertes de structures en milieu périurbain et le lotissement urbain. Bien que les équipes DRATT du SCF et FPInnovations aient partagé certains membres du personnel et des observations, leurs analyses ont été menées de manière indépendante.

Bien que Parcs Canada et d'autres partenaires aient fourni des données et des documents essentiels pour soutenir l'analyse, toute interprétation scientifique a été réalisée par le DRATT. Ce rapport met l'accent sur les observations directes et les mesures du comportement d'incendie de forêt (**Encadré 2**), complétées par des références à des études scientifiques et des rapports, le cas échéant. Certains phénomènes incendiaires de

courte durée – tels que les rafales, l'effondrement de la colonne de convection et le dépôt de tisons – n'ont pas été pleinement capturés par les photographies, les capteurs ou d'autres dispositifs de mesure. Dans ces cas, les mécanismes les plus probables ont été déduits en utilisant des principes physiques établis, basés sur les témoignages du personnel sur le site.

Les indicateurs clés du comportement d'incendie, y compris la vitesse de propagation, l'intensité et la tendance d'incendie à monter dans la cime des arbres, sont présentés avec des descriptions exhaustives des conditions météorologiques et des combustibles. Les mesures quantitatives, telles que l'intensité du front (exprimée en kW/m), sont utilisées pour appuyer une interprétation précise pour les professionnels et chercheurs spécialisés en feux de végétation. La base de la plupart de la terminologie spécifique à la science des feux dans ce rapport est la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF), un cadre standard pour classer le risque d'incendie et prédire le comportement d'incendie à travers le Canada [3], [4], [5] et défini dans le glossaire du CIFFC (<https://glossary.cifc.ca/>). Des renseignements généraux sur la prédiction du comportement d'incendie dans le terrain montagneux sont discutés dans l'**Encadré 2**. Pour une introduction à la prédiction du comportement d'incendie, le guide de l'utilisateur de la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt [6] est recommandé.

Pour faciliter la lecture, une liste des abréviations utilisées dans le texte se trouve à l'annexe B11. Toutes les heures sont indiquées en heure avancée des Rocheuses (HAR), sauf indication contraire.

Encadré 2. Comportement d'incendie, conditions météorologiques de montagne, et limites de modélisation

Le comportement des incendies de végétation décrit comment les combustibles de végétation s'enflamment, comment les flammes se développent et comment les incendies se propagent [7]. La recherche sur le comportement des incendies de végétation s'appuie sur des perspectives interdisciplinaires provenant de la foresterie, de l'écologie, de la météorologie, de la climatologie, de la thermodynamique, de la mécanique des fluides et d'autres domaines [7] pour aider à identifier les mécanismes qui sous-tendent l'activité des incendies de végétation ainsi que d'avoir des prévisions sur la manière dont les incendies se propagent à travers des paysages complexes. Traditionnellement, le comportement d'incendie a été considéré à travers les interactions de trois éléments clés composant l'environnement d'incendie : les combustibles, les conditions météorologiques et la topographie, souvent appelés le « triangle du comportement d'incendie ». Un seul facteur peut dominer dans certaines situations – des conditions météorologiques extrêmes, par exemple, ont tendance à prévaloir sur les variations de type de combustibles [8], tandis que dans des situations de faible vent, les conditions de combustibles peuvent être les plus influentes. Toutefois, ces facteurs n'existent pas de façon isolée, et de nombreuses interactions entre les différentes variables de l'environnement d'incendie sont importantes. L'humidité du combustible de surface, par exemple, est très sensible aux effets de la structure du combustible et de la topographie sur le microclimat au sein des peuplements forestiers [9], [10], [11]. Les interactions entre les trois facteurs et l'incendie lui-même génèrent également des rétroactions continues sur les processus atmosphériques, comme les vents induits par le feu [12]. Certaines de ces interactions ne sont actuellement prises en compte que dans des modèles incendie-atmosphère complexes [13], et elles ne sont ni bien validées [14], ni mises en œuvre de façon opérationnelle [15].

Les prévisions du comportement d'incendie sont particulièrement difficiles dans le terrain montagneux, où des variations complexes de la pente, de l'aspect et de l'altitude exercent de fortes influences sur les courants d'air et la propagation d'incendie [16]. Les vallées peuvent canaliser les vents en augmentant la vitesse et les turbulences. Il y a une tendance pour les vents locaux à souffler de manière ascendante pendant la journée, et en descente pendant la nuit en raison du réchauffement et du refroidissement diurnes. Les altitudes élevées sont généralement plus fraîches, mais les inversions de température peuvent piéger l'air frais (et la fumée) dans les fonds des vallées pendant la nuit. Lorsque les inversions se dissipent en raison du réchauffement diurne, des augmentations soudaines de l'intensité d'incendie peuvent se produire [17].

La température, l'humidité relative (HR) et l'humidité du combustible varient avec l'altitude. La température et l'humidité relative diminuent généralement avec l'altitude et augmentent sur les versants sud et ouest, en particulier avec la lumière directe du soleil, tandis que l'humidité des combustibles augmente avec l'altitude ainsi que sur les versants nord et est. Toutefois, le rétablissement de l'humidité relative durant la nuit peut être faible en haute altitude, ce qui maintient les combustibles secs pendant la nuit. Les incendies se propagent plus rapidement en montée en raison du préchauffage des combustibles au-dessus des flammes, ce qui peut contribuer au développement de la colonne de convection. Cependant, la direction de la propagation d'incendie et la vitesse de propagation sont influencées par l'interaction du vent et de la pente. De plus, bien que les débris enflammés puissent dévaler des pentes escarpées, de telles pentes et les configurations de vent peuvent également transporter des tisons en avant de l'incendie principal.

Le modèle opérationnel de prévision météorologique le plus détaillé du Canada présente une résolution horizontale de 2,5 km près de la surface [18], bien qu'une version expérimentale utilisée dans ce rapport offre une résolution de 1 km. Bien que ces modèles puissent capturer les effets de la topographie sur la canalisation du vent, ils ne résolvent pas les vents ascendants et descendants ni les variations de microclimat dans un terrain complexe.

2. Complexe combustible et conditions du combustible

2.1 Historique des incendies et dynamique des combustibles de la vallée de la haute Athabasca

La composition et les caractéristiques de la biomasse vivante et morte qui se consomment pour soutenir un incendie de végétation sont collectivement appelées le complexe combustible [19]. La charge (quantité de matière combustible par unité de surface), la composition (mélange d'espèces et état de la végétation dominante), la structure (organisation spatiale), la continuité (présence ou absence de discontinuités verticales ou horizontales), la chimie et la teneur en humidité (fortement influencée par les conditions météorologiques) des combustibles sont toutes reconnues comme des facteurs influençant le comportement des incendies de végétation [10]. Les propriétés des combustibles sont dynamiques. La teneur en humidité des combustibles morts varie quotidiennement, voire toutes les heures, en fonction des conditions météorologiques, tandis que celle des combustibles vivants varie selon les saisons. Au fil des années à des décennies, les processus écologiques, y compris la croissance de la végétation, la mortalité naturelle et la décomposition, les perturbations naturelles telles que les incendies de végétation et les épidémies d'insectes modifient la charge de combustible, la structure et la composition des espèces.

Le complexe combustible impliqué dans les incendies South Fire et North Fire (Section 2.3) était typique des communautés de végétation dans les Rocheuses canadiennes centrales, écorégion de l'est des chaînons continentaux [20] :

- Zone montagnarde (élévation approximative, 1 000 – 1 350 m) : dominée par des sapins de Douglas inéquienne (*Pseudotsuga menziesii*), des pins tordus latifoliés (*Pinus contorta*) et des peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) dans les zones de fond de vallée, avec des épinettes blanches (*Picea glauca*) trouvées dans des zones riveraines bien drainées.
- Zone subalpine inférieure (élévation approximative, 1 350 – 1 600 m) : caractérisée par les pins tordus latifoliés, les épinettes d'Engelmann (*Picea engelmannii*) et les sapins subalpins (*Abies lasiocarpa*) dans les zones à bas de pente et mi-pente.
- Zone subalpine supérieure (élévation d'environ 1 600 – 2 200 m) : principalement peuplée par les épinettes d'Engelmann et les sapins subalpins, dans les zones mi-pente et en haut pente.

La zone de toundra alpine dépourvue d'arbres se trouve en altitude élevée et le long des crêtes. Tous les peuplements forestiers subissaient les effets de différents degrés de suppression des feux et d'exclusion, un changement prononcé affectant la végétation dans les forêts sèches à travers l'Amérique du Nord au cours du siècle dernier.

Avant le 19^e siècle, l'activité des incendies dans les parcs nationaux des Rocheuses canadiennes était historiquement fréquente, alimentée à la fois par l'effet de la foudre et par les pratiques de brûlage autochtone [21], [22]. Un modèle de feux fréquents et de sévérité mixte entretenait une mosaïque végétale diversifiée caractérisée par une charge de combustible plus faible et une moindre sensibilité aux grands incendies de cime, en particulier dans les forêts montagnardes. L'échantillonnage de charbon de bois dans le petit lac Trefoil près du Jasper Park Lodge a révélé la présence de 55 incendies au cours des 3 500 dernières années, avec des intervalles de retour d'incendies de remplacement de peuplement d'environ 50 à 115 ans [23]. Une autre étude s'est basée sur l'analyse des cicatrices d'incendie et des cohortes établies après incendie sur un site situé à 12 km au nord du lotissement urbain de Jasper, et a identifié un régime de sévérité mixte avec des intervalles moyens de retour des incendies de 14 à 165 ans, soit environ un incendie dans la zone d'étude tous les 20 ans [24]. Les forêts de la vallée de la haute Athabasca ont principalement été générées par des incendies en 1889 et 1906, bien que des arbres plus anciens isolés étaient courants, en particulier dans la zone montagnarde [24], [25]. Les photographies historiques du levé topographique effectué en 1915 par M.P. Bridgland, reprises par le Mountain Legacy Project, fournissent des preuves visuelles de la mosaïque de forêts matures et des peuplements en régénération plus jeunes après ces incendies [26]. Cette mosaïque de végétation a été perturbée par le mandat de lutte contre les incendies mis en place au 20^e siècle, ce qui a entraîné la formation de forêts plus denses et plus continues à travers les Rocheuses et les régions avoisinantes de la Cordillère [27], [28], [29], [30].

À partir des années 1980, Parcs Canada a commencé à restaurer les régimes de feux naturels, principalement par le biais de brûlages dirigés, ce qui a aidé à réduire la charge de combustible et la connectivité dans les zones traitées [31]. Malgré ces efforts, aucun feu dirigé n'a eu lieu dans la zone du périmètre de l'incendie South Fire au cours des dernières décennies. Depuis 2000, la gestion des combustibles s'est principalement concentrée sur la réduction des risques autour du

lotissement urbain de Jasper et des terrains de camping (Section 2.4 et Section 5.2).

2.2 Étendue et gravité des attaques du dendroctone du pin ponderosa

L'épidémie de dendroctone du pin ponderosa (DPP) qui a commencé dans le centre de la Colombie-Britannique au début des années 2000 représente l'un des changements les plus significatifs à l'échelle continentale dans la végétation forestière et les conditions de combustible du siècle dernier. Elle continue d'influencer la dynamique des écosystèmes dans le nord de la Colombie-Britannique (C.-B.), en Alberta, et les parcs nationaux des Rocheuses [32], et peut potentiellement se propager dans les forêts boréales et subboréales du centre et de l'est du Canada [33]. Bien que le débat scientifique persiste concernant l'influence de l'épidémie sur le danger d'incendie et le comportement d'incendie [34], les saisons d'incendies extrêmes en Colombie-Britannique ont révélé des paysages très inflammables à la suite d'une mortalité importante de pins [2], [35]. Une étude récente a révélé que les zones touchées par le DPP en Colombie-Britannique ont connu 1,7 fois plus de grands incendies causés par la foudre que les zones non touchées; cependant, il y avait une probabilité réduite de grands incendies d'origine humaine [36].

Les écologistes et modélisateurs d'incendies reconnaissent généralement les arbres touchés par le DPP selon des catégories basées sur le temps écoulé depuis l'attaque du dendroctone : la phase d'attaque rouge (1–5 ans), la phase d'attaque grise (5–15 ans) et la phase d'attaque post-épidémique (>15 ans) [37], [38]. La **Figure 2** présente la répartition estimée des années de l'attaque basée sur les enquêtes aériennes du relevé des insectes et des maladies des arbres menées par RNCAN dans le parc national Jasper [39], extraites selon les limites du périmètre du complexe d'incendies de Jasper le 2 août 2024. La gravité maximale des épidémies autour du lotissement urbain de Jasper et dans la vallée de la haute Athabasca s'est produite de 2016 à 2018. En conséquence, la plupart des peuplements forestiers touchés par le DPP à l'intérieur du périmètre de l'incendie étaient au stade gris précoce, 6 à 8 ans après les attaques. Dans ces peuplements, la plupart du feuillage de pins était tombé sur le tapis forestier, tandis que la majorité de la structure des branches restait intacte dans le couvert forestier [40], [41].

Bien que les changements observés dans le couvert forestier suite à l'attaque du DPP aient été documentés dans des études précédentes, les conséquences sur le comportement d'incendie restent variées et difficiles à prévoir [42], [43]. Cette imprévisibilité provient des commentaires concurrents entre la structure du combustible altérée et le microclimat (annexe A1) ainsi que des limitations dans la manière dont la plupart des modèles d'incendie représentent la combustion des débris ligneux [44], [45]. Enfin, peu d'études ont évalué les effets du DPP en utilisant des expériences représentatives sur le terrain.

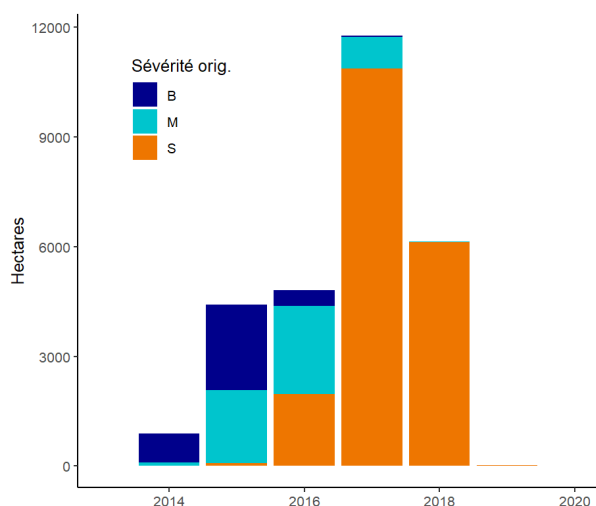


Figure 2. Répartition annuelle de la zone d'épidémie du dendroctone du pin ponderosa (DPP) de 2014 à 2020, dans le périmètre de l'incendie South Fire le 2 août 2024. La zone affectée a été calculée à partir des données de relevés aériens annuels [39]. Les couleurs représentent la gravité de l'épidémie cartographiée à l'origine (F-faible, M-modérée, S-sévère), bien que de nombreuses parcelles faibles et modérées aient par la suite augmenté en gravité d'ici 2017 ou 2018. En 2019, l'épidémie de DPP s'était effondrée dans l'ensemble du parc, et la nouvelle zone affectée était restée petite (<500 ha) de 2020 à 2022.

2.3 Végétation et complexe combustible

Les combustibles peuvent être évalués en détail grâce à des mesures sur le terrain, mais ils sont souvent cartographiés de manière plus large en utilisant des systèmes de classification basés sur la végétation [3], [46]. Des informations détaillées sur l'inventaire forestier ont été fournies par le programme de l'Inventaire des ressources végétales (VRI) du parc national Jasper. Cet ensemble de données combine l'interprétation des images orthorectées à haute résolution avec des relevés au sol pour évaluer et cartographier les caractéristiques des forêts. La carte du VRI la plus récente, dérivée de l'imagerie de juillet 2022, comprend une gamme d'attributs forestiers au niveau du peuplement tel que la composition des espèces, la mortalité, la fermeture du couvert forestier, la hauteur des arbres, la surface terrière, l'âge, l'histoire des perturbations, les caractéristiques du sous-étage et la forme du terrain. Les caractéristiques des peuplements sont cartographiées au niveau du polygone, avec une taille moyenne d'environ 5 ha. Pour cette analyse, les types de végétation à l'intérieur du périmètre du complexe d'incendies de Jasper ont été extraits de la couche de VRI et reclassés pour l'interprétation et l'affichage.

Une carte de couverture végétale du VRI simplifiée est présentée dans la **Figure 3**, combinant l'inventaire de végétation et les données sur la mortalité des arbres. Les types de peuplements forestiers sont décrits par les principales espèces vivantes, définies comme une seule espèce composant 75 % ou plus de la surface terrière. L'épinette d'Engelmann et le sapin subalpin étaient regroupés (épinette-sapin) en raison de leur chevauchement fréquent et de leur structure de cime

similaire. Les peuplements d'espèces mixtes comprennent les forêts mixtes (>25 % de la surface terrière des conifères vivants et des espèces arborescentes décidues) et les conifères mixtes (>75 % de conifères, divisés entre 2 ou plusieurs espèces vivantes, à l'exclusion de l'épinette-sapin); cependant, les deux types mixtes ne représentaient qu'une petite portion de la couverture végétale totale. Des descriptions détaillées de la végétation dans la zone du périmètre du complexe d'incendies de Jasper sont fournies dans le **Tableau 1**.

Avant l'incendie et les perturbations du DPP, le pin tordu latifolié était l'espèce dominante dans le paysage, se trouvant à la fois dans des peuplements purs et des peuplements mélangés. Au moment de l'incendie, environ 90 % de la zone à l'intérieur du périmètre était boisée, avec des peuplements de pins tordus latifoliés et d'épinette-sapin représentant chacun environ 43 % de la zone forestière. Les peuplements dominés par le sapin de Douglas représentaient environ 8 % de la superficie totale (9 % de la forêt), tandis que les peuplements feuillus, les zones non forestières (définies comme un couvert forestier <10 %, excluant les pins morts) et les zones non combustibles (corps d'eau, etc.) constituaient chacun environ 5 % du paysage. Les pins morts résultant de la mortalité du DPP constituaient un composant significatif du complexe combustible, avec des pins morts sur pied dans divers états dans la plupart des peuplements; la majorité (59 %) de la superficie des forêts de conifères et mixtes est estimée avoir été dans un état de mortalité modérée (35–64 % morts) ou sévère (≥65 % morts) (**Tableau 1**) avant l'incendie. À noter que ces classifications reflètent des niveaux de mortalité du pin plus élevés que ceux utilisés dans les études du DPP antérieures dans l'Ouest canadien [47], [48].

Tableau 1. Type de peuplement et classe de mortalité causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) à l'intérieur du périmètre du complexe d'incendies de Jasper avant l'incendie. Voir la **Figure 3** pour les classes de mortalité du DPP.

Type de végétation (espèce dominante)	Catégorie de gravité du DPP (ha, % des arbres touchés)				Superficie totale (ha)	% de la superficie
	Très faible 0 – 9 %	Faible 10 – 34 %	Modérée 35 – 64 %	Sévère ≥65 %		
Pin tordu latifolié	540 (2)	1 843 (7)	4 265 (16)	5 815 (21)	12 463	39
Épinette-sapin	5 233 (19)	1 802 (7)	2 850 (10)	2 403 (9)	12 288	38
Sapin de Douglas	1 331 (5)	361 (1)	472 (2)	364 (1)	2 528	8
Espèces mixtes	74 (0)	0	9 (0)	4 (0)	87	0
Forêt affectée par le DPP						
Superficie (ha)	7 178	4 006	7 596	8 586	27 366	85
Pourcentage	26	15	28	31	100	
Feuillu ^a	-	-	-	-	1 564	5
Non forestière	-	-	-	-	1 741	5
Eau et non-combustible	-	-	-	-	1 510	5
Superficie totale					32 281	100

^a Peuplement de type feuillu comprend des proportions non spécifiées d'arbres morts, principalement dans la classe de mortalité de 0 à 9 %.

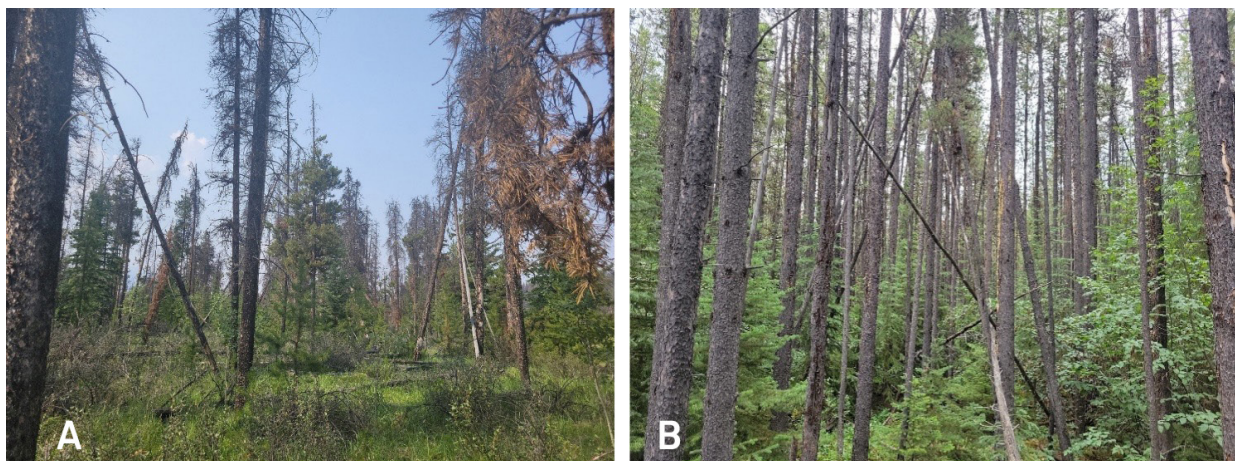


Figure 4. Structure des combustibles dans la vallée de la haute Athabasca. **A.** Peuplement de pins typiques, à faible densité, à la phase de l'attaque grise aux basses altitudes près de l'autoroute 93 au sud. Cet emplacement n'a pas brûlé en raison d'une fosse de gravier adjacente. La plupart des aiguilles sont tombées des pins matures, mais la structure des branches fines reste principalement intacte. **B.** Structure typique d'une zone subalpine inférieure avant l'incendie (élévation, environ 1 450 m) avec un peuplement mixte de pins tordus latifoliés et d'épinettes-sapins, avec une mortalité minimale de l'étage dominant, en dehors du périmètre de l'incendie. En plus des conifères de l'étage dominant, il y a un sous-étage dense d'épinettes et de sapins subalpins qui peut agir comme combustible étagé pour le déclenchement d'incendie de cime.

Pour l'évaluation opérationnelle du comportement d'incendie, la végétation et la biomasse sont fréquemment classées comme types de combustible. La Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI) est un sous-système de la MCEDIF (notée dans la Section 1.3) qui génère des résultats quantitatifs sur le comportement d'incendie (vitesse de propagation, intensité d'incendie, etc.) en fonction du type de combustible, des conditions météorologiques et des données topographiques. Les types de combustible de la PCI [4], [5], [49] sont discutés plus en détail dans la section 5, dans le contexte des calculs du comportement d'incendie, et un exemple d'une carte des types de combustible de la PCI est présenté à l'annexe B1.

La **Figure 4** montre des photos des peuplements forestiers représentatifs de l'état des pins tordus latifoliés et des forêts d'épinettes-sapins avant l'incendie. Comme noté précédemment, la répartition excessive de l'étage dominant était en cours parmi les pins morts : le feuillage avait largement disparu du couvert forestier et était devenu une litière en décomposition; les combustibles de bois de branches mortes et de troncs commençaient à se déplacer du couvert forestier vers le tapis forestier.

Durant le déploiement de la DRATT en août, l'équipe a mené des enquêtes sur l'incendie de cime et la consommation de combustibles à l'intérieur du périmètre de l'incendie (section 5.5). Ce travail a utilisé un ensemble de données très opportunes concernant les parcelles

de structure de combustibles collectées par les étudiants et les professeurs de l'Université de Lethbridge [41]. La reprise des mesures de ces parcelles a abouti à un ensemble de données qui a servi de base à l'estimation de la consommation de combustibles, un déterminant majeur de l'intensité globale de l'incendie.

2.4 Opérations de réduction des risques d'incendie

Pour faire face aux menaces d'incendies de végétation, les gestionnaires mettent de plus en plus en œuvre des traitements de gestion des combustibles tels que l'éclaircie et les feux dirigés. Ces projets tentent de modifier la structure des peuplements en réduisant la charge de certains composants du complexe combustible, généralement pour réduire les risques d'incendie. Les opérations d'éclaircie comprennent une coupe partielle des arbres du couvert forestier. Les traitements d'éclaircie du bas (également appelés éclaircie légère) ciblent les peuplements à haute densité pour réduire la continuité des combustibles étagés et des couverts forestiers et créer des conditions moins propices aux incendies de cime [50], tandis que les traitements d'éclaircie du haut (également appelés éclaircie de cime) comprennent l'élimination sélective des arbres dominants et co-dominants pour augmenter l'espacement, réduire la densité de la cime et diminuer le risque d'incendie de cime actifs en réduisant la densité de masse du couvert forestier [41]. Dans la réduction des risques d'incendie,

les traitements d'éclaircie du bas sont couramment appliqués aux peuplements connaissant une mortalité élevée, avec une élimination agressive des arbres morts sur pied et des espèces hautement inflammables, telles que l'épinette. Étant donné les opportunités limitées pour la recherche expérimentale sur les feux, une grande partie de notre compréhension actuelle de la manière dont les traitements d'éclaircie influencent le comportement d'incendie dans les forêts de conifères nord-américaines provient d'études de cas sur les incendies de forêt ou de modélisation avec une validation limitée [51], [52], [53]. En fin de compte, les traitements de gestion des combustibles de conifères visent à réduire le potentiel de déclenchement et de propagation des incendies de cime, réduisant ainsi l'intensité d'incendie, le taux de propagation et le comportement de dissémination. L'objectif global est d'améliorer la sécurité et l'efficacité des opérations de suppression et de renforcer la sécurité publique et la résilience des communautés dans les zones à risque élevé. Les opérations mécaniques de réduction des risques d'incendie impliquent l'enlèvement sélectif d'arbres (vivants ou morts) et de débris ligneux; les feux dirigés peuvent également être un type d'opérations de réduction des risques d'incendie, et l'éclaircie et le brûlage peuvent être combinés. Cependant, aucune opération impliquant un feu dirigé n'a été réalisée dans le périmètre de l'incendie du South Fire depuis l'établissement du parc.

De 2003 à 2022, un total de 1 518 ha d'opérations de réduction des risques d'incendie ont été mises en œuvre pour réduire le risque d'incendie dans le lotissement urbain de Jasper et le milieu périurbain adjacent (campings, développements, corridors routiers; **[Figure 1]**). Les spécifications des traitements ont varié quelque peu au fil du temps, mais dans l'ensemble, il s'agissait d'une combinaison d'éclaircies par le bas et par le haut, effectuées mécaniquement, visant à réduire le potentiel de comportement extrême des incendies de cime et à améliorer les possibilités de suppression des incendies. Les combustibles étagers et des couverts forestiers ont été coupés à la main ou à la machine pour réduire la densité du peuplement et les charges de combustibles du couvert forestier. Les peuplements forestiers présentant des problèmes de santé des forêts importants (c.-à-d. la mortalité due au DPP) ont été traités en priorité. D'autres objectifs étaient fréquemment spécifiés, y compris l'amélioration de l'habitat faunique, de l'intégrité des écosystèmes, des valeurs culturelles et de la qualité visuelle.

L'analyse des répercussions des opérations de réduction des risques d'incendie sur le comportement d'incendie, y compris la fraction brûlée des cimes (FBC), la hauteur de carbonisation et la consommation de combustible, peut être trouvée dans la section 5.2.

3. Conditions météorologiques propices aux incendies

3.1 Conditions précédant le feu

L'accumulation de neige dans la région pendant l'hiver 2023-2024 était généralement inférieure à la moyenne. Au col Yellowhead, à environ 800 m plus élevée et à 30 km à l'ouest du lotissement urbain de Jasper, un manteau neigeux remarquablement faible a été enregistré sur la base des observations de 1996 à 2023. Malgré cela, la neige a disparu seulement une semaine plus tôt que la moyenne. En revanche, au domaine skiable de Marmot Basin, situé à 925 m d'altitude et à 8 km au sud du lotissement urbain de Jasper, le manteau neigeux de la fin de la saison 2023-2024 était d'environ 90 % de la moyenne. Au poste de garde de Jasper, une profondeur de neige de plus de 1 cm a été enregistrée pour la dernière fois le 29 mars.

Durant le mois de juin 2024, typiquement le mois le plus humide de l'année, très peu de pluie était tombée. Des conditions sèches et des températures chaudes (**Figure 5A**) ont entraîné une hausse de l'indice du combustible disponible (ICD; **Encadré 3**) au cours de ce mois et qui est considéré un record par rapport à un enregistrement climatologique sur 62 ans (**Figure 5B**).¹ Cependant, à la fin de juin et au début de juillet, une quantité significative de pluie est tombée au poste de garde de Jasper, réduisant l'ICD à un niveau proche de la médiane. Au début de juillet, un important système de haute pression bloquant s'est formé au-dessus de l'ouest de l'Amérique du Nord, comme en témoigne l'anomalie positive marquée de la hauteur géopotentielle à 500 mbar illustrée à la **Figure 6A**. Ces conditions synoptiques ont conduit à des conditions météorologiques chaudes et sèches soutenues dans la région, comme l'indique une forte anomalie négative dans le taux quotidien de précipitation (**Figure 6B**). Aucune pluie quotidienne supérieure à 2 mm n'a été enregistrée au poste de garde de Jasper ou dans les stations voisines du 1^{er} au 22 juillet 2024, tandis que des températures record ont été enregistrées dans les jours précédant l'incendie (**Figure 6A**). Durant cette période de 23 jours, l'ICD a augmenté rapidement d'une valeur proche de la médiane à un niveau extrême (ICD de 169), la valeur la plus élevée enregistrée pour cette période de l'année (**Figure 6B**) et au-dessus du 99^e percentile pour toutes

les valeurs de la saison des incendies (mai-septembre). Le 22 juillet, il y avait 55 incendies incontrôlés en Alberta et 149 incendies incontrôlés en Colombie-Britannique.

Parce que l'ICD est calibré pour des conditions dans des forêts de conifères fermées (**Encadré 3**), il est probable que le séchage du combustible ait été encore plus important que prévu en raison de la perte de couvert forestier en raison de l'attaque du DPP discutée dans la Section 2.2. La perte du couvert forestier est associée à l'augmentation des vitesses du vent et du rayonnement solaire au niveau du tapis forestier [54]. Un exercice de modélisation a été entrepris pour simuler le changement dans le microclimat du tapis forestier afin de générer un « ICD majoré » (**Figure 5B**). Cette analyse a suggéré qu'une augmentation supplémentaire de 38 % de l'ICD effectif serait attribuable à cette perte de couverture (annexe A1).

Dans les jours précédant l'allumage, le système à haute pression persistant qui a conduit à des conditions sèches et chaudes a commencé à se décomposer alors qu'un système à basse pression se déplaçait vers l'intérieur des terres depuis l'océan Pacifique. Ce système a généré une instabilité significative dans toute la région comme l'indiquent les valeurs élevées de l'énergie potentielle de convection disponible (EPCD; **Figure S-6** dans l'annexe B3). L'EPCD est une mesure de l'instabilité atmosphérique, c'est-à-dire la capacité de l'atmosphère à soutenir l'activité convective verticale et le développement d'orages. Les conditions atmosphériques instables peuvent favoriser un comportement d'incendie extrême [55].

La fumée régionale a également affecté la zone à ce moment-là, en provenance des incendies au sud du parc national Jasper dans l'est de la Colombie-Britannique, et à travers la région de la forêt boréale occidentale, de la Saskatchewan au nord-est de la Colombie-Britannique.

¹ Cette section utilise l'ensemble des données sur les conditions météorologiques propices aux incendies de forêt de 1962 à 2023 pour analyser les composantes de la méthode d'indice forêt-météo, puisque cette période plus longue permet de tenir compte des épisodes de sécheresse rares, mais importants. La climatologie de 1991 à 2020 est utilisée lors de la discussion des anomalies mensuelles de température et de précipitations conformément aux pratiques exemplaires d'Environnement et Changement climatique Canada.

Encadré 3. La Méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo (IFM)

L'indice forêt-météo (IFM) est un sous-système majeur de la MCEDIF (Section 1.3) conçu comme un système de suivi permettant de consigner l'évolution du danger d'incendie tout au long de la saison des feux. Le système utilise trois indices principaux (sans unité) qui réagissent à des vitesses différentes aux changements météorologiques : l'indice du combustible léger (ICL), l'indice de l'humus (IH) et l'indice de sécheresse (IS). Ces indices sont calculés en utilisant des principes physiques pour approximer les processus de séchage et de mouillage et sont calibrés empiriquement pour les forêts de pins boréaux avec un couvert forestier fermé. L'ICL est la composante la plus rapide, adapté pour estimer l'inflammabilité et la réactivité des litières d'aiguilles de conifères au sommet du tapis forestier, tandis que l'IS est la composante qui change le plus lentement, suivant l'accumulation progressive de sécheresse sur plusieurs semaines voire plusieurs mois, nécessitant une d'importantes précipitations pour diminuer. Ces trois indices sont combinés avec la vitesse du vent pour générer des indices de propagation et de danger d'incendie, l'indice de propagation initiale (IPI), l'indice du combustible disponible (ICD) et l'indice forêt-météo (IFM). Le système est traditionnellement basé sur un seul calcul quotidien à midi, mais peut également être appliqué aux observations horaires, ou à une combinaison de composantes quotidiennes avec des vents horaires [57]. Depuis son développement, les composantes de l'IFM se sont révélées efficaces pour prédire l'humidité des combustibles dans les forêts canadiennes [58] et elles sont régulièrement cartographiées comme outils d'aide à la décision pour les agences canadiennes de gestion des incendies [59]. L'IFM a également été adopté ou adapté dans plusieurs autres pays. Des améliorations sont toujours en cours pour une mise à jour importante du système, prévue pour être publiée en 2025 [60].

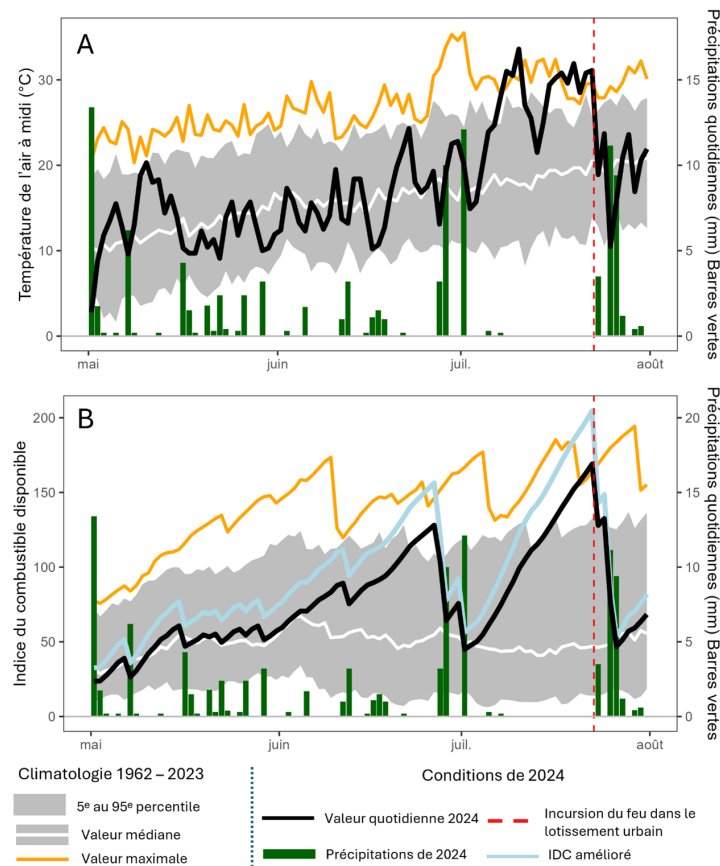


Figure 5. La météo du poste de garde de Jasper entre mai et juillet 2024 comparée à la climatologie de 1962 à 2023. **A**, température de l'air à midi. **B**, ICD journalier. L'ICD majoré comprend l'impact de la défoliation causée par le DPP sur le séchage du combustible. Pour les périodes où la station météorologique du poste de garde de Jasper ne faisait pas d'enregistrements, des valeurs interpolées provenant de stations voisines sont utilisées.

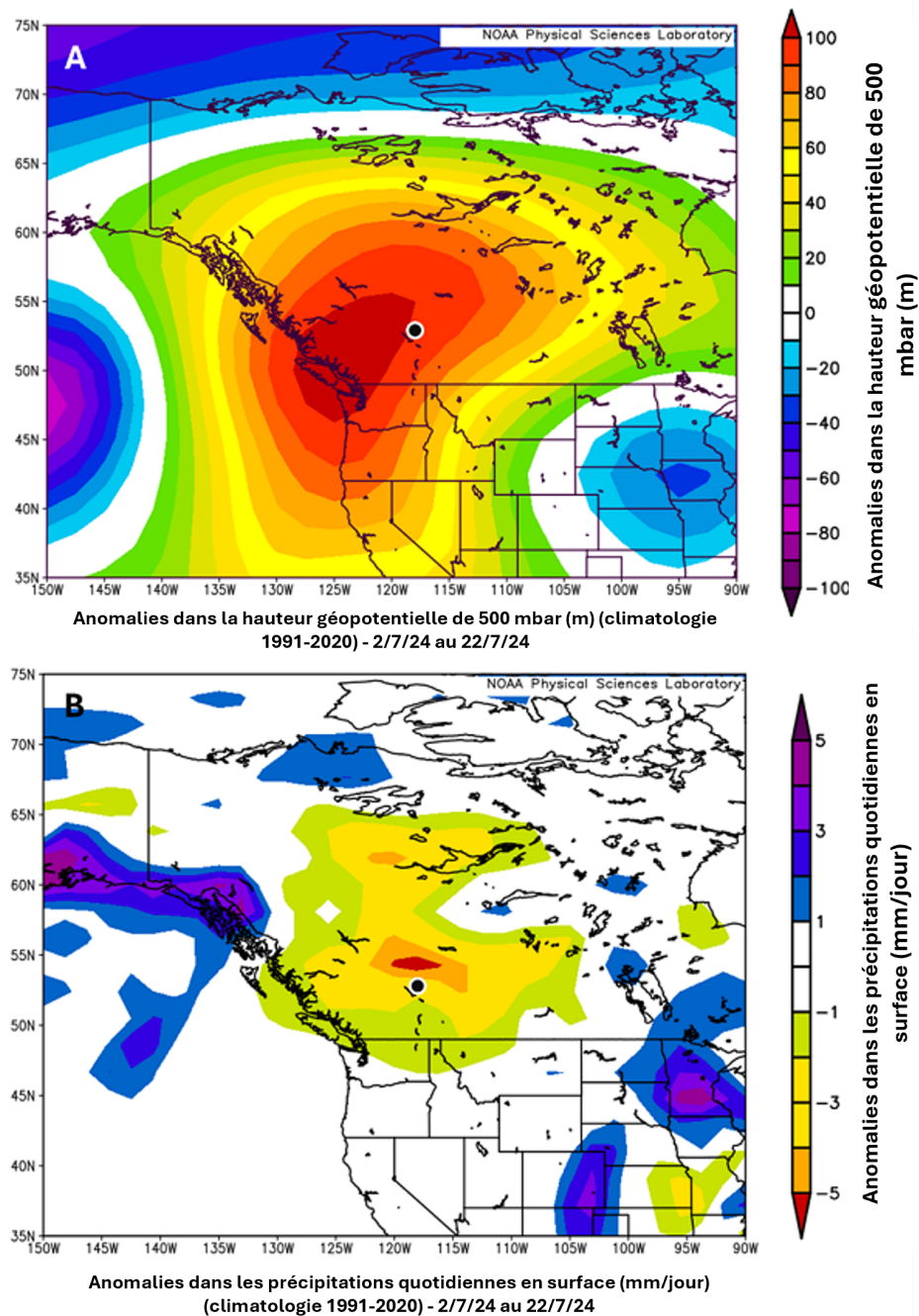


Figure 6. Cartes météorologiques de l'Ouest canadien montrant la crête de haute pression persistante et le manque de pluie pendant les 22 jours précédant l'allumage. **A**, Les anomalies de la hauteur géopotentielle à 500 mbar **B**, Anomalies des précipitations journalières. Les anomalies sont définies comme la différence entre les conditions de 2024 et la moyenne à long terme de 1991 à 2020. L'emplacement de Jasper est indiqué par le point noir et blanc. Source : Les images proviennent du Laboratoire des sciences physiques (PSL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder Colorado : <https://psl.noaa.gov/>.

3.2 Conditions pendant la période de combustion

Les **Figure 7** et **Figure 8** présentent des graphiques météorologiques résumés (« météoigrammes ») pour quatre stations météorologiques de surface situées à proximité, chacune étant utile pour représenter les conditions de surface dans une portion de l'incendie durant l'événement de propagation. Des effectifs semblables pour d'autres stations d'intérêt peuvent être trouvés dans l'annexe B5.

La station Ranger Creek était bien située pour enregistrer les conditions du fond de vallée près des allumages et de l'extrémité sud de l'incendie South Fire. Elle a enregistré des vents très légers tout au long de l'incident, sauf pour des rafales isolées, en particulier autour de l'heure de l'allumage. Bien que le poste de garde de Jasper soit le plus proche de la collectivité et le plus représentatif des combustibles de la zone montagnarde inférieure (section 2), il a connu des coupures de courant pendant la période du 22 au 24 juillet qui ont limité son utilité.² La station Dorothy, située à environ 12 km au

nord-ouest de Jasper et à 500 m de plus en altitude, représentait les conditions dans la vallée de Miette orientée est-ouest, l'autre élément majeur canalisant les vents près du site du lotissement urbain. De plus, les stations à plus haute altitude étaient utiles pour représenter les conditions en haut des crêtes, moins influencées par le terrain local et la végétation. La station Paradise exploitée par la station de ski Marmot Basin a capturé les conditions de la zone subalpine supérieure près de la limite des arbres, signalant des conditions plus fraîches, mais des vents beaucoup plus actifs au moment de l'allumage le soir du 22 juillet, et tout au long de la soirée, de la nuit et du matin du 23 juillet. La station Tangle, près du centre d'accueil des Glaciers (Annexe B5), a été utile pour représenter les conditions alpines, caractérisées par des températures beaucoup plus fraîches, mais des vents plus forts que dans les forêts en contrebas.

Les valeurs des composantes de l'IFM sont présentées dans le **Tableau 2** pour trois stations météorologiques. Les trois stations avaient indiqué des conditions de sécheresse critiques y compris un tapis forestier complètement sec dans la vallée de l'Athabasca au moment de l'allumage, avec un ICL de 94–96 et un ICD de 153–169. L'IPI maximal a été calculé avec l'ICL journalier et la vitesse du vent horaire maximale. Le 22 juillet, cette valeur a atteint un pic de 28,4 à Ranger Creek, ce qui suggérait un potentiel développement significatif de l'incendie au moment de l'allumage.

² La première coupure de courant s'est produite pendant la tempête convective associée aux allumages deux incendies, South Fire et North Fire, et pourrait avoir été causée par un coup de foudre selon le personnel du parc national Jasper (Marmot Basin aurait perdu l'électricité à peu près au même moment). Le courant a été rétabli dans la soirée du 23 juillet, mais il a été à nouveau coupé peu avant que l'incendie n'atteigne le lotissement urbain de Jasper l'après-midi suivant (le 24 juillet); cette panne a été associée à l'évacuation finale du bâtiment des opérations du parc national Jasper.

Tableau 2. Valeurs IFM standard ^a des trois stations météorologiques à proximité immédiatement avant et pendant la période principale de combustion du complexe d'incendies de Jasper, du 21 au 24 juillet 2024

Jour	Temp (°C)	HR (%)	VV (km/h)	VV maximale (km/h)	DV (degré)	Pluie sur 24 h (mm)	ICL	IH	IS	IPI	IPI Max ^b	ICD	IFM
Poste de garde de Jasper													
21	30,8	27	4,0	13,4	64 °	0	94,3	124	595	9,7	15,4	163	37
22	31,1	22	6,1	9,0	356 °	0	94,7	130	605	11,2	13,1	169	41
23 ^c	18,9	30	12,6	12,6	260 °	3,5	78,6	87	598	1,9	1,9	128	10
24 ^c	23,7	33	6,6	12,2	35 °	0	88,7	91	606	4,9	6,6	133	21,8
Ranger Creek													
21	33,3	15	12,1	14,6	128 °	0	96,3	115	507	19,0	21,6	147	55
22	30,0	23	6,7	21,2	306 °	0	95,9	121	516	13,7	28,4	153	45
23	23,4	20	6,9	9,8	295 °	2,0	87,7	105	524	4,4	5,0	140	20
24	27,2	15	6,0	13,9	173 °	0	94,7	111	532	11,3	16,7	146	39
Dorothy													
21	30,0	28	7,2	10,6	140 °	0	93,1	120	508	9,6	11,3	151	36
22	29,0	24	6,9	19,5	316 °	0,5	93,9	126	517	10,5	19,9	156	38
23	18,9	30	12,6	12,6	260 °	2,0	84,1	107	524	3,5	3,5	142	17
24	21,8	23	10,1	12,2	270 °	0	91,4	111	532	8,8	9,7	146	33

Abréviations : ICD, indice du combustible disponible; IS, indice de sécheresse; IH, indice de l'humus; ICL, indice du combustible léger; IFM, indice forêt-météo; IPI, indice de propagation initiale; IPI Max, IPI horaire maximal; HR, humidité relative; Temp, température; DV, direction du vent; VV, vitesse du vent.

^a Pour des détails sur l'IFM, voir la section 3.1, **Encadré 3**.

^b L'IPI Max a été calculé en utilisant la vitesse du vent horaire maximale (VV Max) avec la valeur de l'ICL journalière standard (ICL), une pratique acceptable [57]. Cela a été fait afin d'éviter les effets des conditions d'humidité changeantes rapidement à la station météorologique, qui n'ont peut-être pas affecté l'humidité du combustible près de l'incendie.

^c En raison d'un manque de données, les observations pour le poste de garde de Jasper du 23 juillet 2024 sont prises à partir de la station Dorothy. Un pluviomètre au sein du complexe opérationnel du parc national Jasper à proximité a enregistré 3,5 mm de pluie le matin du 23 juillet. Les valeurs des composantes de l'IFM pour les 23 et 24 juillet doivent être considérées comme des estimations, en particulier les valeurs de l'ICL et de l'IPI.

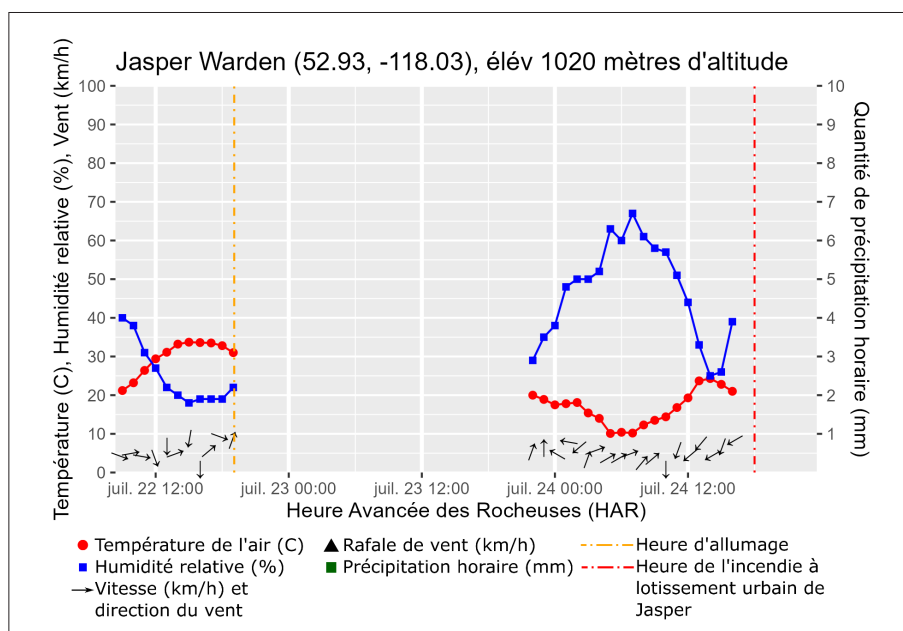
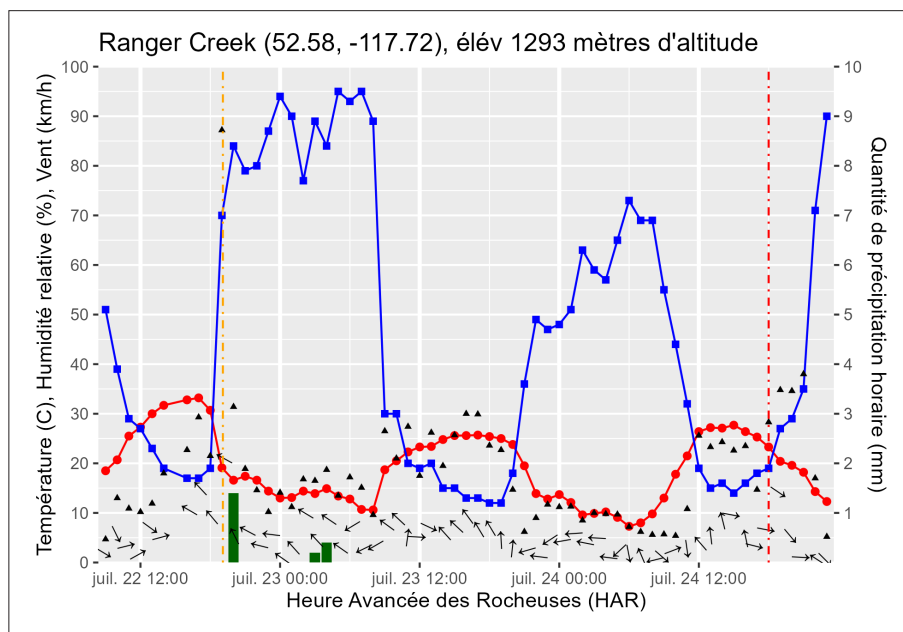


Figure 7. Observations météorologiques de surface horaires aux stations météorologiques de Ranger Creek (en haut) et du Poste de garde de Jasper (en bas), du 22 au 24 juillet 2024. Les lacunes de données dans les enregistrements du poste de garde de Jasper étaient apparemment causées par des pannes de courant; voir la note de bas de page 2 pour plus de détails.

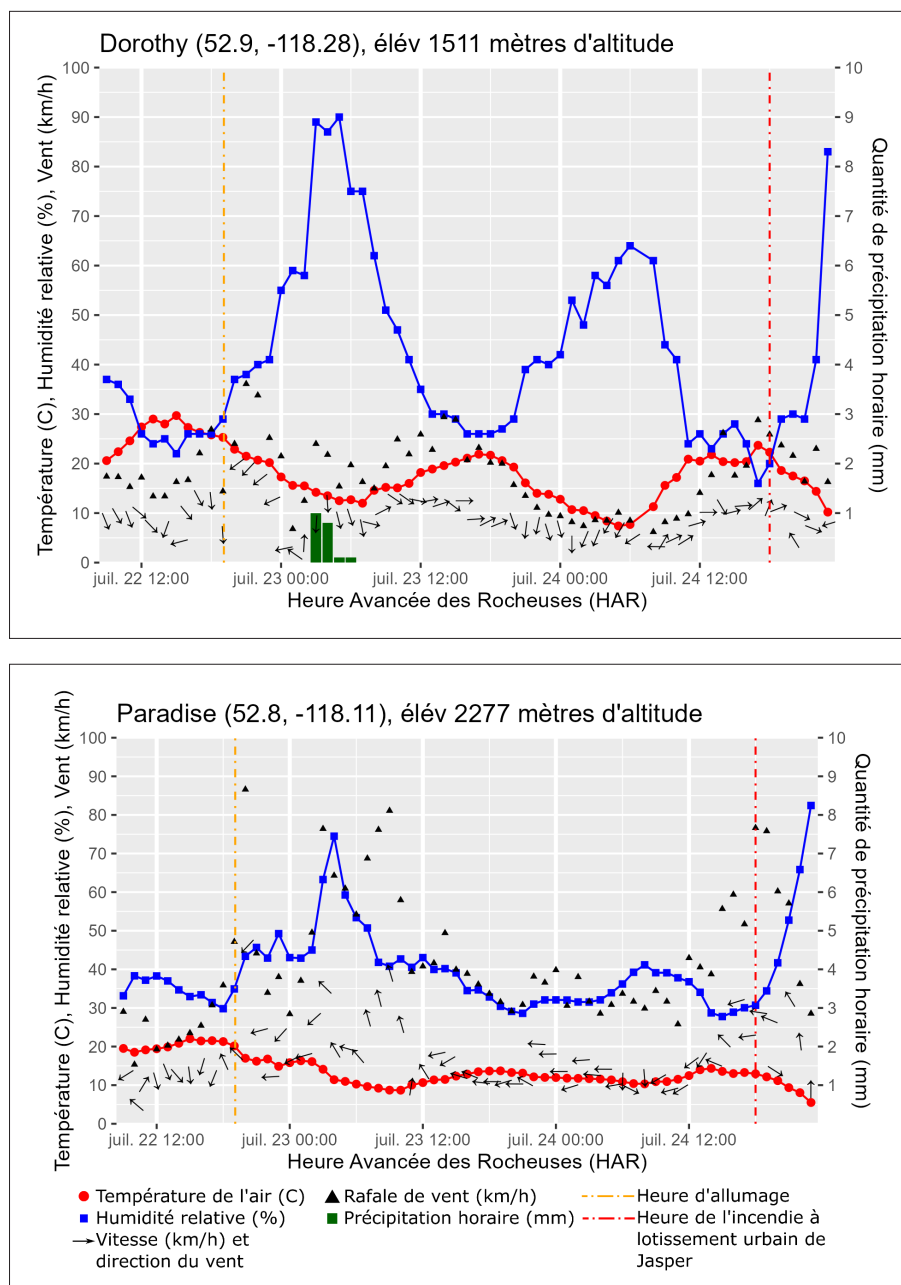


Figure 8. Observations météorologiques de surface horaires aux stations météorologiques de Dorothy et Paradise (Marmot Basin) du 22 au 24 juillet 2024.

Pour compléter les observations de la station météorologique, des données météorologiques de haute résolution (1 km) provenant d'une version expérimentale du modèle du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) [18] d'Environnement et Changement climatique Canada ont également été analysées. L'EPCD modélisée (annexe B3) suggère que bien que la rupture de la crête de haute pression ait conduit à une instabilité dans la région dans les jours précédant l'incendie; l'instabilité dans et autour de Jasper était faible pendant la majeure partie de la progression de l'incendie.

La **Figure 9** fournit des profils de vent modélisés à partir du SHRPD pris à partir de points de grille proches du front pendant la période de combustion. Les vents en altitude et les vents de surface étaient les plus forts durant le matin du 23 juillet, une période qui a également connu des vents de direction sud-est relativement élevés et des vents de surface. Durant les autres périodes, les vents provenaient généralement du quadrat sud dans

toute la colonne atmosphérique. Les cartes de la vitesse et de la direction du vent de surface modélisées dans la région sont présentées dans la Figure S-7 (annexe B4) pour plusieurs périodes durant la période de combustion. Le vent persistant du quadrat sud dans la vallée d'Athabasca est également visible ici. Comme on pouvait s'y attendre, la direction du vent au lotissement urbain de Jasper, situé à la jonction de plusieurs vallées, était plus variable, avec des zones locales de vitesses de vent convergentes et divergentes. En général, les vitesses de vent de surface modélisées près du front de l'incendie étaient de 5 à 15 km/h. Ces vents modélisés fournissent une idée générale des champs de vent externes affectant l'incendie; les champs de vent réels dans et autour de l'incendie ont été significativement altérés par l'incendie lui-même, qui n'était pas inclus dans le modèle. De plus, l'activité de tempête convective à petite échelle, comme l'événement qui a conduit aux allumages et à la rafale descendante localisée observée à la station Ranger Creek (section 4.1), ne serait également pas résolue par le modèle.

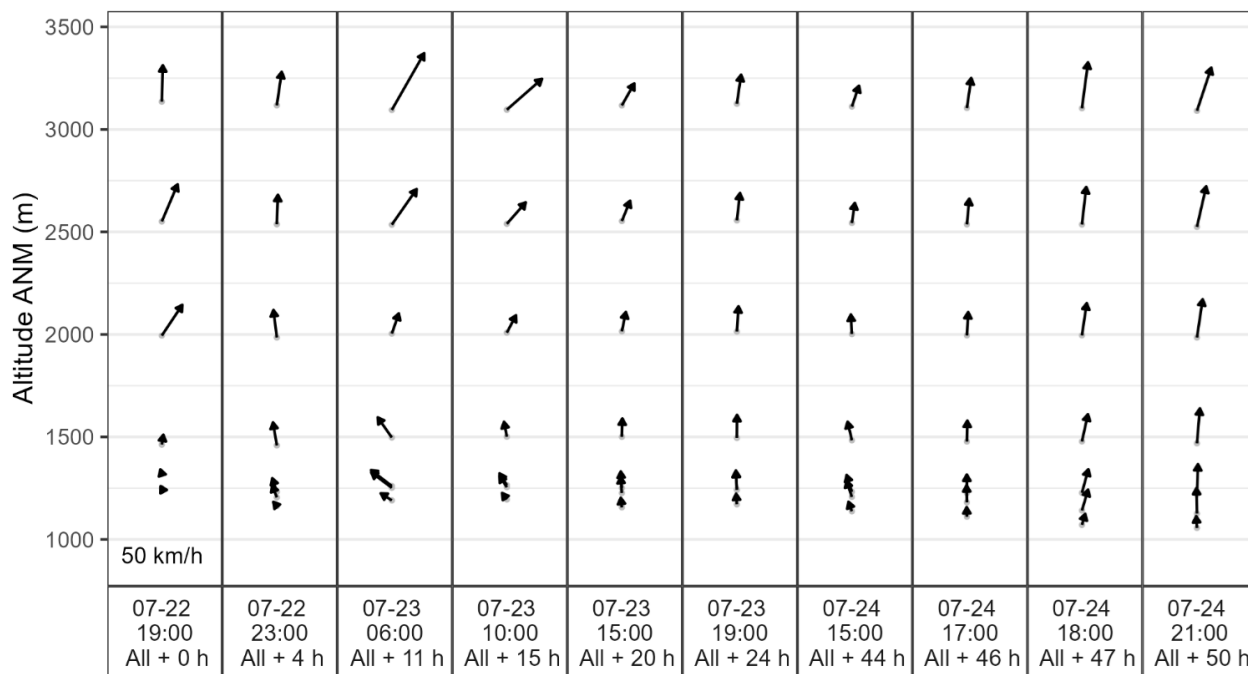


Figure 9. Profils de vent modélisés par le SHRPD près du front du complexe d'incendies de Jasper. ANM indique au-dessus du niveau de la mer; SHRPD, Système à haute résolution de prévision déterministe. All, allumage. Les flèches représentent les vecteurs du vent (direction et vitesse) indiquant l'influence sur la propagation du complexe d'incendies. Un vecteur de référence de 50 km/h est fourni (en bas à gauche).

4. Chronologie du développement de l'incendie

Cette section fournit une description détaillée de l'évolution des conditions météorologiques propices aux feux et du développement de l'incendie sur 5 demi-journées au cours des 52 heures entre l'allumage vers 19 h le 22 juillet 2024, et le développement de l'incendie se stabilisant à Roche Bonhomme à 23 h, pendant une averse (**Table 3**). Une attention particulière est accordée à l'après-midi et au soir du 24 juillet lorsque l'incendie au sud a atteint le lotissement urbain de Jasper. La progression de l'incendie a été cartographiée en utilisant une combinaison d'images satellites et d'imagerie aérienne. Cette imagerie comprenait des produits de détection des « points chauds » d'incendie actifs, des satellites détectant une intensité infrarouge élevée indiquant une source de chaleur. Ces données ont été obtenues pour 11 sites à partir des capteurs du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) et de l'imageur Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) sur les satellites d'observation de la Terre de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); des images brutes en infrarouge à ondes moyennes provenant de l'instrument VIIRS (annexe B6); ainsi que 13 photographies aériennes obliques prises par le personnel de lutte contre l'incendie qui ont été enregistrées sur un modèle numérique d'altitude (annexe A2). Des observations supplémentaires du comportement d'incendie ou des événements météorologiques (p. ex., fumée, vent, tisons) ont été rapportées sur la base d'entretiens avec le personnel de lutte contre les incendies. Pour connaître l'emplacement des éléments du paysage mentionnés dans cette section, voir les **Figures 11, 13, 16, 19–20, et 22**.

4.1 Allumage de l'incendie : 22 juillet, 19 h 5

Le 22 juillet à la station Ranger Creek (1 293 m), environ 10 km au sud de l'emplacement de l'allumage, les conditions les plus chaudes et les plus sèches se sont produites à 17 h. Les conditions de combustibles indiquaient une probabilité d'allumage continue supérieure à 90 % dans les forêts de pins tordus latifoliés [61] et le potentiel pour un comportement d'incendie de cime continu même sous des conditions de vent léger [5]. La rupture de la crête à haute pression qui avait persisté pendant plusieurs jours a apporté des conditions atmosphériques instables cet après-midi, y compris des orages, à travers une vaste région s'étendant du col Crowsnest dans le sud-ouest de l'Alberta à Prince George, en Colombie-Britannique

(Figure S-5 dans l'annexe B3). Le radar d'Environnement et Changement climatique Canada se trouvant à la montagne Silver Star près de Vernon, en Colombie-Britannique, a suivi un orage se déplaçant vers le nord depuis Mica Dam au lac Kinbasket (à environ 90 km SSO de Jasper) à 17 h 30.

L'activité de foudre a commencé près des frontières sud, est et nord du parc national Jasper vers 17 h 50. Le Réseau canadien de détection de la foudre a enregistré trois coups de foudre à 6 km d'intervalle sur les rives est et ouest de la rivière Athabasca à une altitude de 1 210 à 1 260 m (annexe B2). Le premier éclair a eu lieu à 19 h 5, à environ 2 km au sud-est des chutes Athabasca, près de la base du mont Kerkeslin. Les deuxième et troisième éclairs ont suivi à 19 h 6 et 19 h 8, à environ 4 km au nord-ouest des chutes Athabasca près de la route 93, au nord et nord-est du lac Leach (**Figure 1**). Les vents à Ranger Creek ont augmenté à 21 km/h avec des rafales atteignant 87 km/h à 19 h, coïncidant avec les éclairs et le passage des cellules orageuses. Les estimations du SHRPD pour 19 h au site d'allumage étaient les suivantes : température, 29 °C; humidité relative, 27 %; vitesse du vent, 2 km/h au SE. Les vents ont été modélisés à 36 km/h SSO à environ 800 m au-dessus du niveau du sol. Les orages ont apporté 1,4 mm de pluie à la station de Ranger Creek, où l'humidité relative a fortement augmenté à 20 h.

L'incendie North Fire semble également avoir été déclenché dans la soirée du 22 juillet, avec le premier rapport d'incendie reçu à 18 h 45 près de la station de transfert de Jasper. La cause du North Fire faisait toujours l'objet d'une enquête en juillet 2025, et aucune frappe éclair nuage-sol n'a été détectée par le Réseau canadien de détection de la foudre à ce moment-là dans le périmètre final de l'incendie North Fire (annexe B2).

4.2 Intervalle 1 : Du 22 juillet à 19 h 5 au 23 juillet à 6 h 6 (0–11 h)

Les valeurs horaires des conditions météorologiques et les valeurs de l'IFM enregistrées à la station Ranger Creek juste avant et pendant cet intervalle sont fournies dans le **Tableau 4**. La station de Ranger Creek à 19 h a enregistré un IPI horaire de 22,1, bien que l'IPS effectif à la ligne d'arrêt ait été estimé à 28,4.³ Le type de combustible C-2 selon la PCI, un choix raisonnable pour représenter les peuplements de conifères épinette-

³ Calculé en utilisant un ICL journalier de 95,9 et des vents horaires maximaux (enregistrés à 19 h) de 21,2, en supposant qu'il n'y a pas des séquelles des averses dispersées ou de l'augmentation de l'humidité. Voir le Tableau 2.

sapin subalpins, prédit un comportement d'incendie de cime continu avec une intensité du front (intensité du front; voir Section 5.3) de 78 000 kW/m dans de telles conditions. Des vents légers du sud-est ont été enregistrés à la station de Ranger Creek, immédiatement au sud de l'incendie et à des altitudes plus élevées (stations de Paradise et Tangle Ridge).

dirigeant vers le sud sur l'autoroute 93 semblent montrer une accélération rapide et un développement actif d'incendie de cime du point d'allumage du Mont Kerkeslin (le plus au sud) de 19 h 7 à 19 h 9, accompagnés de vents forts et d'averses; des témoins ont signalé des rafales de vent très fortes et des branches d'arbres cassées frappant leur véhicule.⁴

Les images vidéo capturées par des automobilistes se

Tableau 3. Sommaire des intervalles de progression de l'incendie South Fire pendant la période du 22 au 24 juillet 2024

Temps Début – Fin ^a	Temps écoulé (h)	Zone (ha)	TCR (%)	Description ^b
Intervalle 1				
De 19 h à 6 h 22-23 juillet	4	3 094	143	À 19 h 5, trois allumages ont commencé dans un rayon de 6 km, une du côté est de la rivière Athabasca, au sud des chutes Athabasca, et deux à 2 km à l'ouest de la rivière Athabasca nord et au nord-est du lac Leach; les feux ont couronné en moins de <5 min; un développement rapide de l'incendie s'est produit sur 3 à 5 h; les incendies ont fusionné en un incendie, qui s'est propagé vers le nord sur une distance de 12 km, atteignant 2,5 km au nord de l'embouchure de la rivière Whirlpool (à l'est de l'autoroute 93) et entrant à l'intérieur des limites municipales de Jasper.
	11	3 548	2	
Intervalle 2				
De 6 h à 14 h 23 juillet	15	5 027	9	Des vents légers à modérés venant du sud-ouest; la propagation du feu s'est principalement produite à l'est de la rivière Athabasca, sur les pentes du mont Hardisty, dans le bassin versant du ruisseau Hardisty, jusqu'à la montagne Curator, et à la base de la montagne Amber.
	17	5 321	3	
	18	5 950	11	
	19	8 571	36	
Intervalle 3				
De 14 h à 6 h 23-24 juillet	20	9 701	12	Vents de fond de vallée légers avec une humidité relative faible; à l'est de la rivière Athabasca, l'incendie a atteint Fifth Lake; à l'ouest de la rivière Athabasca, l'incendie a atteint le chemin Edith Cavell.
	21	10 231	5	
	24	11 115	3	
	25	11 203	1	
Intervalle 4				
De 6 h à 14 h 24 juillet	43	13 720	1	Forte inversion matinale jusqu'à 13 h, limitant le développement de l'incendie; le front de l'incendie s'étendait du camping de Wabasso au lac Wabasso.
Intervalle 5				
De 14 h à 23 h 24 juillet	43	15 348	29	À 14 h 10, l'incendie a développé 2 fronts à l'ouest et à l'est de la rivière Athabasca; à 17 h 30, les premières tisons ont été vus dans le lotissement urbain de Jasper; à 17 h 36, le front de l'incendie au nord-ouest a atteint le sommet de The Whistlers; à 17 h 45, la colonne de convection au nord-ouest s'est effondrée, apportant des vents forts et de la fumée de surface dans Jasper; à 18 h, des incendies de surface et des allumages de structures étaient en cours dans le lotissement urbain de Jasper; à 18 h 48, le front de l'incendie au nord-est s'est étendu à partir de la colline Old Fort Point et la montagne Signal jusqu'au Jasper Park Lodge; à 20 h 48, l'incendie s'est étendu sur 6 km du Jasper Park Lodge à Roche Bonhomme; à 22 h, l'incendie s'est étendu sur les pentes raides à Roche Bonhomme jusqu'à la limite forestière; les précipitations ont arrêté le développement de l'incendie peu après 22 h.
	44	17 060	21	
	46	20 725	10	
	47	24 735	18	
	50	29 145	5	

Abréviations : TCR, taux de croissance relative (% ln [ha]/h); HR, humidité relative.

^a Le fuseau horaire est l'heure avancée des Rocheuses (HAR).

^b Pour l'emplacement des éléments remarquables du paysage, voir les **Figures 11, 13, 16, 19, 20, et 22**.

⁴ Basé sur une conversation avec D. Mo et E. Leisure le 26 mai 2025. Des images vidéo brutes captées par téléphones cellulaires sont disponibles (vidéos non censurées; discrétion recommandée) : <https://zenodo.org/records/17009070> [consulté le 2 sept 2025].

Tableau 4. Météo horaire et valeurs du système IFM de la station Ranger Creek pendant l'intervalle 1, du 22 au 23 juillet 2024

Jour	Heure	Temp (°C)	HR (%)	VV (km/h)	Rafale de vent (km/h)	DV (degré)	Précipitation (mm)	ICL horaire	IPI horaire	IFM horaire
22	17 h	33,2	17	15,3	29,3	137	0	95,9	21,2	59,3
	18 h	30,7	19	9,6	21,5	140	0	96,0	16,0	49,8
	19 h	19,1	70	21,2	87,2	119	0	94,1	22,2	61,1
	20 h	16,6	84	5,8	31,4	153	1,4	63,8	0,7	4,2
	21 h	17,4	79	6,6	18,9	118	0	64,9	0,7	4,6
	22 h	16,6	80	3,6	14,6	104	0	65,8	0,7	4,1
	23 h	14,4	87	5,7	10,2	97	0	66,3	0,7	4,4
23	0 h	13,0	94	1,2	14,1	125	0	66,5	0,6	3,7
	1 h	13,1	90	3,4	11,2	138	0	66,9	0,7	4,2
	2 h	14,4	77	10,2	16,8	121	0	67,9	1,0	6,2
	3 h	13,9	89	4,9	16,5	137	0,2	64,8	0,7	4,2
	4 h	14,9	84	9,0	18,7	124	0,4	59,4	0,6	3,9
	5 h	13,4	95	3,2	13,5	125	0	59,7	0,5	2,8
	6 h	12,8	93	7,1	17,2	59	0	60,1	0,6	3,7

Abréviations : ICL, indice du combustible léger; IFM, indice forêt-météo; IPI, indice de propagation initiale; HR, humidité relative; Temp, température; DV, direction du vent; VV, vitesse du vent.

^aPour des détails sur l'IFM, voir la section 3.1, **Encadré 3**.

Les photographies prises à 19 h 11, 6 minutes après la foudre la plus au sud (à 19 h 5), montrent un incendie de cime entièrement propagé avec une grande colonne de fumée sombre et bien organisée (**Figure 10A**). Étant donné leur proximité, il est probable que les deux allumages au Nord aient eu un comportement d'incendie similaire. Les premiers rapports d'incendie dans les enregistrements de répartition radio du parc national Jasper à 19 h 36 ont enregistré deux ou trois colonnes de fumée distinctes de taille similaire.

Les caméras du bassin de Marmot ont enregistré une diminution importante de la visibilité de 8 km à 2 km à 20 h alors que la colonne de fumée du South Fire atteignait le bassin Marmot. Un changement vers des vents plus sud-ouest (Station Paradise) à 20 h 20 a amélioré la visibilité, et deux grandes colonnes de fumée sont visibles sur des photographies fortement inclinées par des vents du sud. Étant donné la proximité des allumages du lac Leach, il est probable que les incendies s'étaient déjà fusionnés à 20 h 20. La fusion des incendies de haute intensité peut provoquer une accélération rapide des incendies à court terme, avec des augmentations à court terme pouvant atteindre jusqu'à 10 fois le taux de propagation [62]. Des flammes sont visibles dans les images de la caméra du bassin

Marmot à un endroit situé à environ 1 km au sud-est du camping Whirlpool Group et du pont sur la rivière Whirlpool sur l'autoroute 93A à 21 h 50. Un comportement d'incendie extrême à l'avant de l'incendie a été observé près de la jonction entre les autoroutes 93 et 93A à 20 h 38 (**Figure 10B**). Les photos à 22 h 12 à l'extrémité sud de l'incendie montrent une intense activité d'incendie de cime se poursuivant au moins jusqu'au coucher du soleil.

Le 22 juillet à 23 h, près de la ligne d'incendie, la température de surface modélisée par le SHRPD était de 22 °C, la température de surface était de 36 %, les vents de surface étaient de 5 km/h au sud-est, et les vents en altitude (env. 800 m au-dessus du sol) étaient de 27 km/h au sud.

Des photos géoréférencées prises peu après l'allumage localisent au moins un des incendies comme étant à proximité de 52,64 N, 117,87 O et il est probable qu'il s'agisse de l'incendie la plus au sud des multiples allumages. Une détection de l'incendie par le Terra de MODIS à 22 h 59 le 22 juillet montre une bande continue de feu d'environ 12 km du nord au sud et jusqu'à 4 à 5 km de large, soit une superficie d'environ 3 100 ha. Un rapport longueur-largeur de

2,4 à 3,0 serait cohérent avec une vitesse de vent de 17 à 22 km/h [5]. Les détections de points chauds par VIIRS du NOAA-20 à 4 h 53 le 23 juillet montrent pas plus de 1 km à 2 km de croissance supplémentaire par rapport aux détections d'incendie à 22 h 59. Le développement de cet incendie était concentré le long

du côté est de l'autoroute 93 alors que l'incendie se déplaçait vers le nord atteignant environ 2,5 km au nord de l'embouchure de la rivière Whirlpool et dans la municipalité de Jasper. Le périmètre de l'incendie à la fin de cet intervalle (23 juillet, 6 h) est montré dans la **Figure 11**.

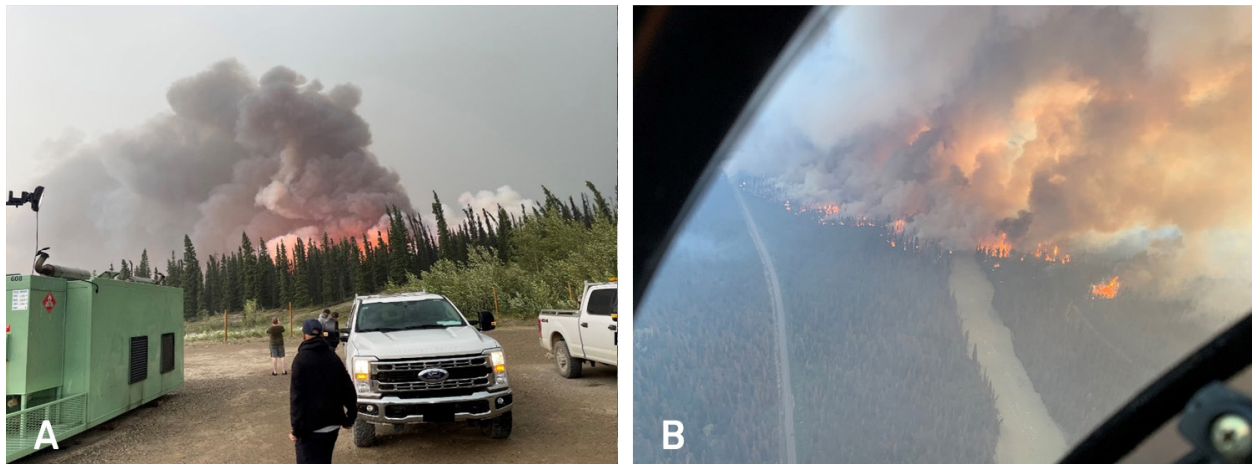


Figure 10. Comportement de l'incendie pendant l'Intervalle 1 du complexe d'incendies de Jasper le 22 juillet. **A**, Comportement d'incendie intense à 19 h 11, 6 minutes après le premier coup de foudre. L'incendie est à environ 1 km de la position du photographe. La grande colonne de fumée foncée et le creux visible des flammes indiquent un comportement d'incendie initial très intense avec implication de la cime. Les effets du vent sont visibles sur les arbres au premier plan à droite, suggérant des vents de surface d'est ≥ 30 km/h associés à la cellule de convection passante. Une légère pluie est visible devant les phares du camion, également associée à la convection. Les renseignements identifiants ont été masqués pour fins de confidentialité. **B**, Comportement de l'incendie au front à 20 h 38, le 22 juillet, 93 minutes après l'allumage. Feu devant à environ 5,5 km au nord-ouest de la jonction sud entre les routes 93 et 93A. La caméra est orientée vers le sud.

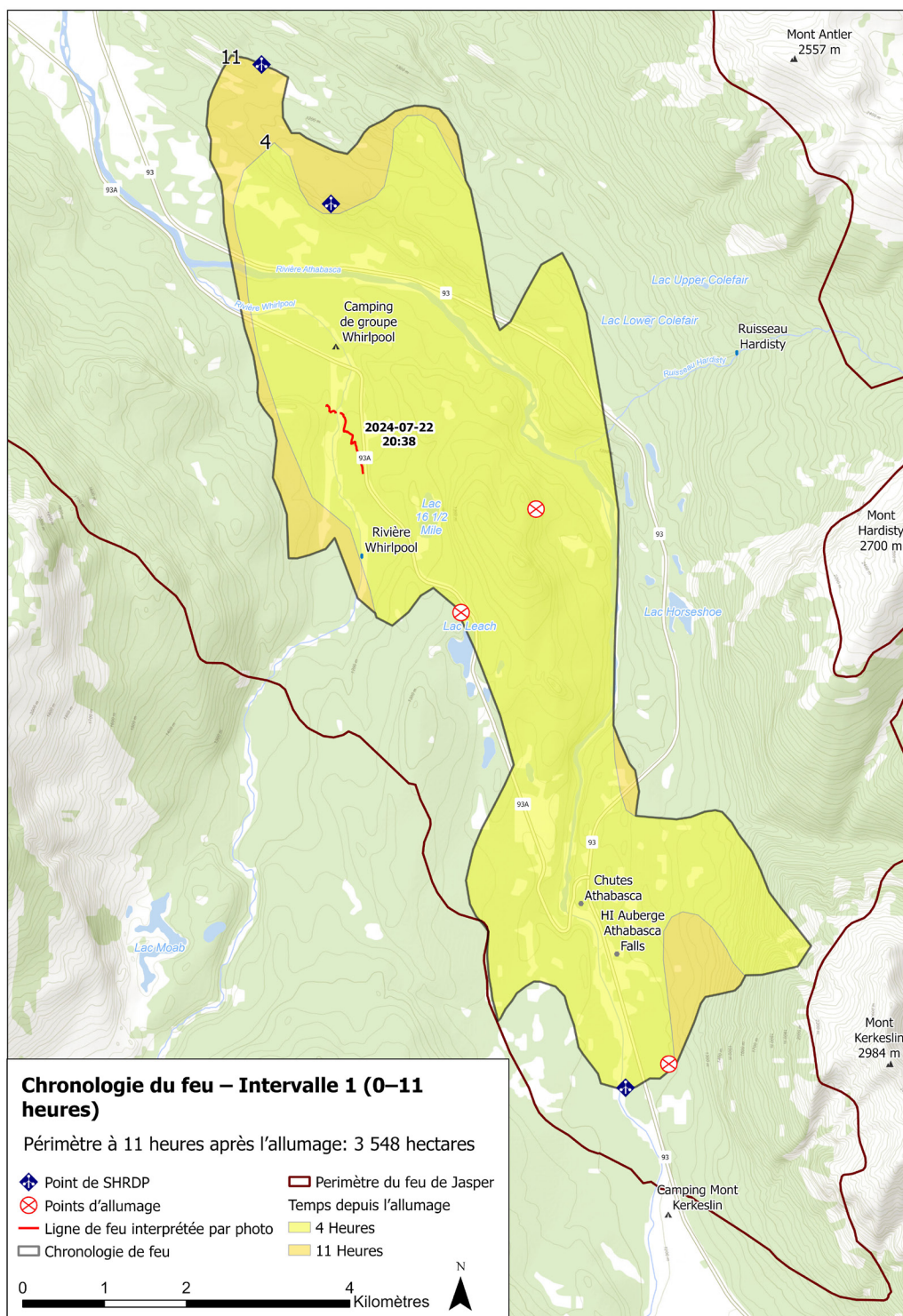


Figure 11. Carte de progression de l’incendie du complexe d’incendies de Jasper de 19 h 5 le 22 juillet à 6 h le 23 juillet (intervalle 1). La surface brûlée était d’environ 3 550 ha à la fin de l’intervalle 1. Les polygones de progression des incendies ont été cartographiés en utilisant une combinaison d’interpolation des données de points chauds par VIIRS et MODIS ainsi qu’une analyse photogrammétrique des photographies aériennes (précision, <5 m). Cartographie du périmètre à partir de photogrammétrie à 20 h 38 le 22 juillet basé sur l’image montrée dans la **Figure 10B**.

4.3 Intervalle 2 : 23 juillet, de 6 h à 14 h (11 à 19 h)

La plupart des stations de surface ont enregistré une bonne récupération de l'humidité relative (HR) pendant la nuit (>80 %) d'ici 06 : 00, mais toutes les stations ont montré une rapide diminution de l'humidité relative pendant les heures de jour. Les valeurs d'HR en début d'après-midi étaient entre 10 % et 30 % dans le fond de la vallée. Durant cet intervalle, les vents moyens à la station Ranger Creek sont restés en dessous de 10 km/h, tandis que les rafales atteignaient jusqu'à 30 km/h. La direction du vent à Ranger Creek était variable. Cependant, les vents à des altitudes plus élevées (station Paradise) variaient entre 10 et 40 km/h, avec des rafales allant jusqu'à 80 km/h. Les vents à la station de Dorothy ont montré un flux constant venant de l'ouest vers la vallée d'Athabasca. À 10 h le 23 juillet près de la ligne d'incendie, la température de surface modélisée par le SHRPD était de 19 °C, l'humidité relative était de 40 %, les vents de surface étaient de 8 km/h au sud-est, et les vents en altitude (env. 800 m au-dessus du sol) étaient de 19 km/h au sud-sud-ouest. Le modèle du SHRPD a suggéré que l'instabilité au sein de la région a considérablement diminué au cours de cette période (Figure S-6 dans l'annexe B3).

L'incendie a été évalué par un aéronef à 9 h 57 le 23 juillet, avec seulement la partie sud-ouest (arrière de l'incendie) le long de l'autoroute 93 visible; basse fumée due à des vents modérés du sud-ouest obscurcissait le front de l'incendie (nord) et le flanc est (**Figure 12A**). Le comportement de l'incendie sur les côtés ouest et sud de l'incendie était visible dans les photographies comme un incendie de surface (classe d'intensité 3 estimée [63]) lors de la première évaluation, mais à 10 h 34, des parties du flanc de l'incendie commençaient déjà à s'élever (**Figure 12B**).

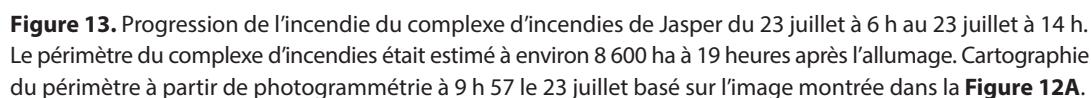
Le front d'incendie n'était visible que brièvement alors qu'il montait les pentes raides sur le mont Hardisty, montrant un comportement d'incendie de cime très intense associé à l'alignement de la pente et aux vents.

Les photos prises par agents d'Air Attack à 12h25 montrent une forte inversion avec une mauvaise ventilation de fumée atteignant c. 4 000 m au-dessus du niveau de la mer; un panache de fumée s'élevant à environ 5 000 m ou plus a été observé à ce moment-là principalement du côté est de l'incendie, suggérant qu'un incendie de très haute intensité projetait de la fumée dans des vents du sud-ouest forts en altitude qui s'étaient déjà développés avant midi. Les officiers d'attaque aérienne intervenant au South Fire ont noté une forte turbulence à 3 000 à 4 000 m au-dessus du niveau de la mer (à ce moment-là, la station Tangle mesurait des vents à 40 km/h, avec des rafales atteignant 70 km/h) et un comportement extrême d'incendie. La progression de l'incendie estimée à la fin du matin et au début de l'après-midi était concentrée sur les régions à l'est de la rivière Athabasca, avec les détections par satellite *Terra* de MODIS de 12 h 28 montrant environ 2 km de croissance vers l'est et en montée jusqu'à la limite des arbres et les pentes abruptes du mont Hardisty. Une croissance vers le nord de 1 à 2 km en direction du lac Wabasso du côté est de la rivière Athabasca a été observée dans cette estimation de périmètre satellite par rapport à l'observation satellite de 4 h 53. La constellation de satellites NOAA, tous équipés du capteur VIIRS, a survolé le South Fire en succession rapprochée à 13 h 2 (*NOAA-20*), 13 h 53 (*NOAA-21*) et 14 h 17 (*S-NPP*) (Annexe B6) et fournit une localisation de feu plus précise que celle obtenue à partir des observations MODIS, car VIIRS a une résolution spatiale plus fine (taille de pixel : VIIRS, 375 m; MODIS, 1 km). Comparé au passage de VIIRS à 4 h 53, le South Fire avait avancé d'environ 4 km



Figure 12. Comportement de l'incendie pendant l'intervalle 2 du complexe d'incendies de Jasper, 23 juillet 2024. **A**, Comportement de l'incendie de surface à 9 h 57. La ligne d'incendie est située à environ 1,4 km à l'est du terrain de camping Wabasso. La caméra est orientée sud-sud-est. **B**, Comportement de l'incendie à 10 h 34. La caméra est orientée nord vers l'arrière du feu à la base du mont Kerkeslin. Les trois allumages par foudre se sont joints pour créer un périmètre d'incendie continu reliant l'autoroute 93 et la rivière Athabasca. Le comportement de l'incendie visible inclut un incendie de cime intermittent à continu à l'avant, avec plusieurs colonnes de fumée distinctes se développant. Le dos et les flancs de l'incendie montrent un comportement d'incendie de surface modéré. La fumée du North Fire est visible en haut à gauche de l'image.

pendant l'intervalle 2 était très limitée en raison des vents du sud-ouest. Une carte du périmètre de l'incendie à la fin de l'intervalle 2 (23 juillet, 14 h) est montrée dans la **Figure 13**.



4.4 Intervalle 3 : Du 23 juillet à 14 h au 24 juillet à 6 h (19 à 35 h)

Les vents du fond de la vallée ont généralement diminué pour devenir des vents légers pendant cette période. La direction du vent à la station Ranger Creek est restée variable, tandis que les vents à la station de Dorothy ont changé de l'ouest au nord. Les vents de mi-pente à la station Paradise sont restés à l'est entre 10 et 20 km/h, avec des rafales allant jusqu'à 40 km/h. Le soir du 23 juillet, il y a eu une augmentation significative de la valeur d'HR dans le fond de la vallée, en particulier à la station de Ranger Creek; au début de la matinée du 24 juillet, les valeurs d'HR variaient entre 60 % et 75 %. À 19 h le 23 juillet près de la ligne d'incendie, la température de surface modélisée par le SHRPD était de 25 °C, l'HR était de 20 %, la vitesse du vent était de 10 km/h au sud, et les vents en altitude (env. 800 m au-dessus du sol) étaient de 25 km/h au sud. L'instabilité atmosphérique modélisée est restée faible pendant cette période (Figure S-6 dans l'annexe B3).

Les photos du comportement de l'incendie pendant l'intervalle 3 sont montrées dans la **Figure 14**. Les incendies North Fire et South Fire étaient bien développés en tant qu'incendies de cime pleinement engagés à 14 h. Une carte du périmètre de l'incendie à la fin de l'intervalle 3 (24 juillet, 6 h) est montrée dans la **Figure 16**. Le South Fire a montré un comportement d'incendie plus intense, avec des hauteurs de flamme supérieures à 30 m observées à 15 h 12. L'activité intense des incendies a été influencée par les vents supérieurs soutenus du sud-ouest qui ont poussé le feu jusqu'à la limite des arbres en direction de la montagne Amber, de la montagne Curator et du col Shovel. L'air très sec (minimum RH de 12 % à la station Ranger Creek) a permis d'observer des incendies de classe 5 sur les incendies du Nord et du Sud jusqu'à au moins 21 h 30 et 23 h, respectivement. Malgré la hauteur significative de la colonne de fumée et l'intensité des incendies, des tisons n'ont pas été soulevés au-dessus de la montagne Amber vers la forêt de l'autre côté, à une distance de 3 à 4 km. Des vents soutenus du sud au sud-ouest au sommet de la crête à la station Tangle (élévation, 3 000 m au-dessus du niveau de la mer) ont été enregistrés à 30 à 40 km/h, avec des rafales de 50 à 70 km/h. Une récupération d'humidité modeste et des vents faibles associés à une inversion ont été observés à 6 h le 24 juillet.

La détection par VIIRS du NOAA-21 à 15 h 33 a montré le premier développement important de l'incendie à l'ouest de l'autoroute 93A. À 20 h, l'incendie a été détecté à moins de 2 km du croisement entre l'autoroute 93A et le chemin Edith Cavell. Les détections par le Terra de MODIS à 22 h 2 localisent la portée nord de l'incendie de 1 à 3 km au sud du sommet du mont Tekarra et à proximité de Fifth Lake. Sur l'intervalle de 6,5 heures entre les observations satellites de 15 h 33 et les observations de 22 h 2 près de Fifth Lake, l'incendie a avancé d'environ 4 km vers le nord-ouest en direction du lotissement urbain de Jasper.

La propagation de l'incendie vers l'ouest et en montée (sur le flanc) a commencé le 24 juillet vers 5 h 30, avec un taux de propagation estimé à un demi à un quart de la vitesse de l'avancée de l'incendie vers le nord. Une importante propagation d'incendie de 3 à 4 km vers l'ouest et le nord-ouest, près de la base du chemin Edith Cavell, a été détectée par VIIRS par le NOAA-20 lors du passage à 2 h 54 (24 juillet). Cependant, cela a probablement capturé la chaleur résiduelle de la propagation d'incendie de la veille. De grandes flammes restaient visibles au sud du lotissement urbain de Jasper bien après le coucher du soleil à 23 h. Cependant, même avec des vents proches de zéro, l'ICL d'environ 90 suggère qu'un taux de propagation d'incendie de 5 m/min (0,3 km/h) serait possible sur un terrain plat, en utilisant le type de combustible C-2 dans la méthode canadienne de PCI pour représenter les peuplements subalpins d'épinette et de sapin ou le peuplement de pin au stade gris, les peuplements de pins morts.

Du jour au lendemain, l'incendie a progressé depuis la rivière Athabasca près de la station Cavell Ranger le long de l'autoroute 93A jusqu'au sommet au nord de Cavell Meadows, couvrant une distance de 3,5 km. Le système de PCI suggère que la pente de 30 % aurait accéléré la progression d'incendie à 11,7 m/min (0,7 km/h) en tant qu'incendie de cime. Des vents sud-ouest en crête, observés à la station Tangle pendant la nuit et jusqu'au matin du 24 juillet, combinés avec le terrain plat, ont probablement empêché une propagation du complexe d'incendies plus à l'ouest ou en pente vers l'auberge Edith Cavell et la rivière Astoria.



Figure 14. Comportement de l'incendie pendant l'intervalle 3 du complexe d'incendies de Jasper le 23 juillet. **A**, Incendie de surface vigoureux avec incendies de cime intermittents sur le flanc de l'incendie à 19 h 14. L'emplacement de la photo est à l'est de la chaîne Edith Cavell, à environ 3 km au sud-ouest du camping Whirlpool, en regardant vers le nord-ouest. **B**, Incendie de cime continu au front de l'incendie à 19 h 18. Les lignes de feu et les emplacements de photos se trouvent respectivement à environ 2 km au sud-est et à 1,1 km au sud-ouest de Five Lakes dans la vallée de Five Lakes. Certaines parties de la tête sont obscurcies par la colonne de fumée. **C**, Incendie entraîné par le panache couplé avec de forts vents sud-est à 20 : 32. L'incendie a été poussé vers la vallée de Five Lakes et sur les pentes du mont Tekarra (sommets visible à gauche). Une photo a été prise depuis le pont de la rivière Miette sur l'autoroute 93A (chemin d'Athabasca) en direction du sud-est. **D**, Incendie de cime continu avec une colonne de fumée bien développée au front de l'incendie à 20 h 30. L'emplacement de la ligne d'incendie était perpendiculaire à l'autoroute 93, à environ 1,5 km au sud-est du ruisseau Tekarra. L'emplacement photo était à la vallée de Five Lakes, faisant face à l'est.

4.5 Intervalle 4 : Le 24 juillet, 14 h (35 à 43 h)

Le matin et le début de l'après-midi du 24 juillet ont connu des températures du fond de la vallée et des valeurs d'HR similaires par rapport à la journée précédente (23 juillet), bien que les valeurs d'HR de l'après-midi de l'après-midi à la station Ranger Creek aient légèrement augmenté. Les vents à la station Ranger Creek ont augmenté tout

au long de l'intervalle 4, mais sont restés en dessous de 10 km/h, avec des rafales allant jusqu'à 25 km/h dans l'après-midi. Les vents à mi-pente à la station Paradise sont restés similaires à l'intervalle 3, mais ont commencé à augmenter dans l'après-midi. À 15 h le 24 juillet, la température de surface modélisée par le SHRPD près de la ligne d'incendie était de 26 °C, l'humidité relative était de 16 %, les vitesses des vents de surface étaient de 10 km/h au sud-sud-est, et les vents en altitude (env. 800 m au-dessus du sol) étaient de 19 km/h au sud.

L'instabilité atmosphérique modélisée est restée faible pendant cette période (Figure S-6 dans l'annexe B3).

Une forte inversion a été observée par le personnel du parc national Jasper à la fois aux incendies South Fire et North Fire, avec une activité incendiaire le matin du 24 juillet limitée à des incendies de surface étendus, mais de faible intensité qui brûlaient sous l'inversion, créant une faible visibilité et des conditions de vol dangereuses. La station Tangle, à 3 000 m d'altitude, ne montrait aucune preuve d'inversion. Au lieu de cela, il a enregistré des vents soutenus du sud-sud-ouest de 30 à 40 km/h, avec des rafales allant jusqu'à >70 km/h et une humidité relative faible se poursuivant depuis la période nocturne précédente et pendant la matinée du 24 juillet. À 12 h 50, l'inversion de vallée avait commencé à se dissiper, avec des colonnes de fumée sur le chemin Edith Cavell au-dessus des sentiers en lacet montrant l'influence des vents du sud-ouest en altitude.

Les photos du comportement d'incendie pendant l'Intervalle 4 sont montrées dans la **Figure 15**. Les

passages du satellite *Terra* de MODIS à 10 h 32 et 12 h 8 étaient partiellement obscurcis par une épaisse fumée et des nuages. Bien qu'une activité significative des incendies ait été observée la soirée du 23 juillet au bord est de l'incendie, les épaisses fumées et les vents du sud-ouest ont obscurci le bord est de l'incendie durant cet intervalle. Les observations d'incendie par satellite à 12 h 8 ont révélé une intense activité incendiaire à l'ouest de l'autoroute 93A et en amont de la crête séparant la rivière Astoria et la vallée principale de l'Athabasca. Les mêmes images satellites ont identifié l'emplacement de l'incendie comme s'étendant de l'adjacente au terrain de camping Wabasso jusqu'au lac Wabasso. Ces observations de 12 h 8 par le satellite *Terra* de MODIS sont limitées à une résolution de 2 km à la limite du survol satellite. La photographie d'incident provenant d'aéronefs à voilure tournante corrobore l'évaluation par satellite. Une épaisse fumée a également empêché les avions de voler en toute sécurité sur le bord est de l'incendie près de la base des montagnes Amber et Tekarra.

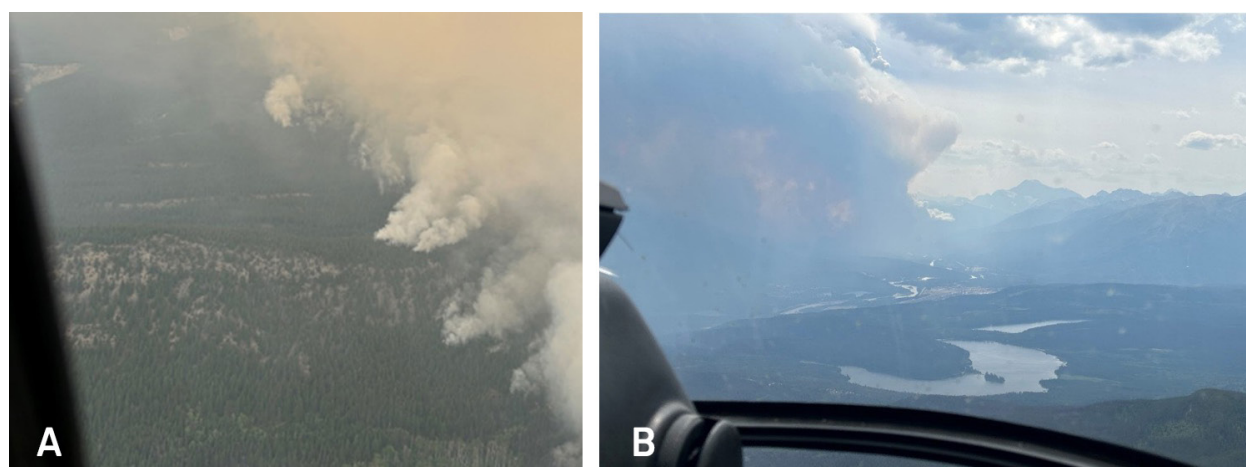


Figure 15. Comportement de l'incendie pendant l'Intervalle 4 du complexe d'incendies de Jasper, 24 juillet. **A**, L'étendue de l'incendie la plus au nord à 12 h 54. La caméra est orientée nord-est à partir du sentier de la vallée de Five Lakes, environ 750 m au sud de Five Lakes, vers la face du mont Tekarra. **B**, Une colonne de fumée bien développée est présente sur toute la vallée d'Athabasca à 13 h 41. L'influence des vents du sud-ouest en altitude poussant la fumée vers l'est (à gauche dans l'image) est évidente. Les minces nuages supérieurs qui obscurcissaient les images satellites dans l'intervalle 4 sont également visibles. La caméra est orientée vers le sud en direction du lotissement urbain de Jasper et du mont Edith Cavell ainsi que de la vallée de l'Athabasca à partir de la base de la montagne Pyramid.

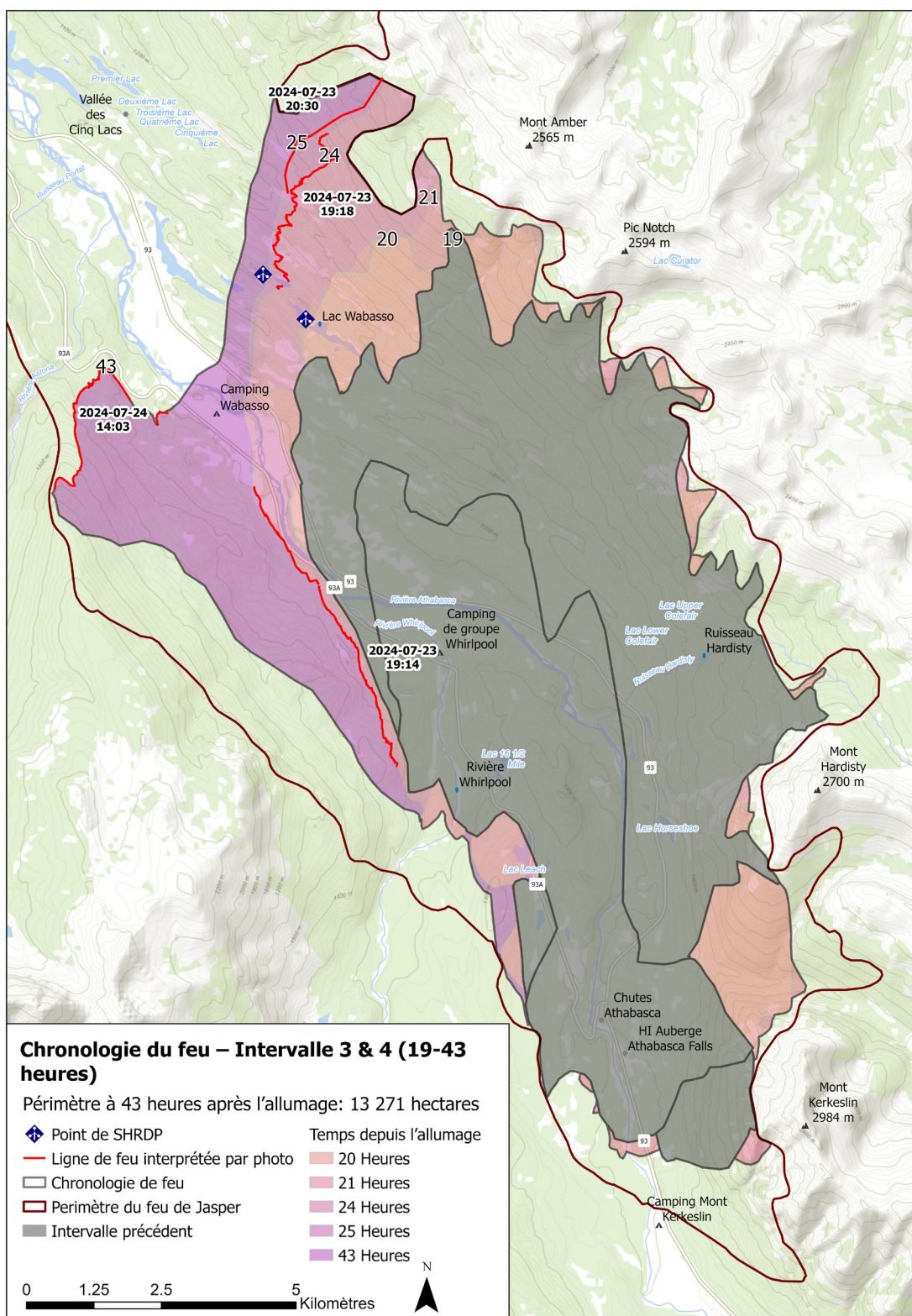


Figure 16. Progression du feu pendant les intervalles 3 et 4, du 23 juillet à 14 h jusqu'au 24 juillet à 14 h. La surface brûlée est estimée à 13 271 ha à 43 heures après l'allumage. La cartographie du périmètre provient de l'imagerie VIIRS et MODIS, ainsi que de photographies à 19 h 14 (**Figure 14A**), à 19 h 18 (**Figure 14B**), 20 h 23 (**Figure 15C**) le 23 juillet et à 14 h 3 le 24 juillet (**Figure 17A**).

4.6 Intervalle 5 : Le 24 juillet, 14 h, 14 h à 23 h (43 à 52 h)

Cet intervalle avait augmenté les vents dans toute la région et présentait l'activité incendiaire la plus rapide et la plus intense qui a été observée directement par des observateurs aériens et terrestres. La direction du vent est restée variable à la station Ranger Creek, tandis que les vents à la station Dorothy sont restés d'ouest, soufflant dans la vallée de l'Athabasca. Les vitesses du vent à la lisière des arbres à la station Paradise ont augmenté, avec des rafales atteignant environ 80 km/h. D'ici la fin du 24 juillet, HR a augmenté à >80 % avec l'arrivée de pluies généralisées. À 17 h le 24 juillet, la température de surface modélisée par le SHRPD près de la ligne d'incendie était de 25 °C, l'humidité relative était de 18 %, les vents soufflaient à 9 km/h du sud, et les vents en altitude (env. 800 m au-dessus du sol) soufflaient à 23 km/h du sud (**Figure 19**). L'instabilité atmosphérique modélisée est restée faible pendant l'intervalle 5 (annexe B3).

Alors que l'incendie approchait et commençait à menacer le lotissement urbain de Jasper, le personnel restant de lutte contre les incendies de forêt a été évacué et toutes les opérations aériennes ont cessé. Les nuages ont obscurci une partie de l'après-midi et l'imagerie satellite du soir (Annexe B6) alors que l'air humide est arrivé avant l'événement de précipitation en fin de soirée. Par conséquent, il existe moins de photos et d'images de l'incendie pendant cet épisode (intervalles 5.2 et 5.3) et le moment et la nature des mécanismes de propagation d'incendie sont quelque peu spéculatifs.

4.6.1 Intervalle 5.1 : De la rivière Astoria au camping Wapiti, de 14 h à 17 h

Les photos du comportement d'incendie pour l'intervalle 5.1 sont montrées à la **Figure 17** et à la **Figure 18**. La cartographie du périmètre à partir de la photogrammétrie était basée sur des images capturées à 14 h 47 (**Figure 17C**), 14 h 57 (**Figure 17D**), 16 h 55 (**Figure 18B**), et 17 h 2 (**Figure 18C**). Le périmètre à la fin de l'intervalle 5.1 est montré dans la **Figure 19**. Trois observations de propagation d'incendie pendant cet intervalle ont été cartographiées en utilisant une combinaison de méthodes photogrammétriques et de cartographie des points chauds (Annexe A2), produisant trois observations élevées de la propagation et de l'intensité d'incendie, décrites dans les sections 5.3 et sections 5.4. La vitesse de propagation la plus rapide (5-6 km/h; Section 5.4) était associée à la propagation en travers de la pente de la tête ouest du complexe d'incendies (env. 1200–1300 m d'élévation en ASL), entre 14 h 3 et 14 h 30.

Durant l'intervalle 5.1, l'incendie était encore observé comme un seul front continu s'étendant dans toute la vallée à partir de la confluence des rivières Astoria et Athabasca jusqu'au mont Tekarra. À 14 h 3, la colonne de fumée au bas du chemin Edith Cavell a été observée en train de pivoter vers la droite, potentiellement influencée par des vents du sud-ouest alignés avec et s'écoulant

de la vallée de la rivière Astoria. Les colonnes de fumée pivotantes sont indicatives du comportement d'incendie commandé par le panache, lorsque les forces de convection l'emportent sur les influences des vents ambiants [10]. Les attributs typiques des incendies commandés par le panache incluent des vents de surface ambiants légers, une forte charge de combustible et des vents forts situés au-dessus de 3 000 m [64]; toutes ces caractéristiques étaient présentes dans la vallée de la haute Athabasca durant cette période (Section 5.3). Des effets de vent fort ont été observés à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la zone brûlée au camping de Wabasso (Annexe B10), conformément aux observations antérieures des vents induits par l'incendie et du mouvement des débris associés à de tels événements [64]. Les vents induits par le panache ont entraîné un chablis de forte intensité (taux de déracinement par le vent de 100 %) pendant cet intervalle (**Figure 18D**). En l'absence d'incendie, le chablis est plus typiquement associé à des rafales provenant d'orages de convection de courte durée dans les forêts boréales avec des vents de 140 km/h ou plus [65]. L'érosion du sol induite par le vent et l'impact de particules de gravier de 3 mm dans les troncs d'arbres ainsi que l'érosion généralisée et l'écorçage de l'écorce des arbres brûlés sont des modèles de dommages similaires à ceux des tornades classées 4 à 5 sur l'échelle de Fujita (EF) améliorée [66]. Les tornades de cette ampleur présentent des vitesses de vent de 260 km/h ou plus [66]. Ce type de dommage a également été observé sur certaines parties du complexe d'incendies de Grouse en 2023 à West Kelowna. Cet incident a également présenté une intensité d'incendie extrême et des combustibles dominés par le douglas de Menzies et le pin tordu, bien qu'avec une condition de sécheresse extrême et moins de preuves des effets de DPP [67].

Une activité d'incendie intense a également été observée sur les pentes du mont Tekarra, au nord-est et au vent arrière de la colonne de fumée pivotante. La portion orientale du complexe d'incendies n'avait pas de colonne de fumée pivotante documentée, probablement en raison d'une intensité d'incendie plus faible causée par le mouvement sous le vent de la fumée dense, qui peut projeter de l'ombre [68] et augmenter la teneur en humidité des combustibles légers [69]. La fumée a également empêché toutes les opérations d'aéronef et les photographies aériennes à ce moment.

Les peuplements d'espèces arborescentes décidues feuillues (p. ex., tremble) sont normalement associés à une propagation d'incendie beaucoup plus lente que celle des forêts de conifères [70]. Cependant, une parcelle d'environ 25 ha de forêt de trembles largement continue a brûlé pendant cet intervalle, en raison de la combinaison de la sécheresse sévère et de l'intensité du feu environnant. Des preuves de comportement intense d'incendies de surface avec des hauteurs de flammes et des troncs calcinés de 2 à 3 m de hauteur suggèrent un comportement d'incendie de classe d'intensité 4 [63] (**Figure 31**, Section 5.3). L'enlèvement précédent des arbres



Figure 17. Comportement d'incendie entraîné par le panache pendant l'intervalle 5.1 du complexe d'incendies de Jasper, 24 juillet. **A**, Un incendie de cime se manifeste à 14 h 3 avec une rotation de colonne, au sud de l'intersection entre le chemin Mount Edith Cavell et l'autoroute 93A. La caméra est orientée au sud-sud-est. **B**, La colonne de fumée est visiblement sombre à 14 h 39, tandis que des conditions de ciel dégagé permettent de voir le mont Edith Cavell; des vents du sud-ouest dans l'atmosphère inférieure ont incliné la colonne de fumée vers le nord-est en direction de Hinton. La caméra est orientée vers le sud depuis le bloc des services d'entretien de Parcs Canada. **C**, Il y avait un incendie de cime continu avec une colonne bien développée au front de l'incendie à 14 h 47. Le front de l'incendie est perpendiculaire à l'intersection entre la route Marmot et la route 93A, au sud de Portal Creek. La photo a été prise depuis la station supérieure de Jasper SkyTram faisant face au sud-est. **D**, La ligne d'arrêt s'étendait à travers la vallée à 14 h 57. La ligne d'arrêt a une forme en U depuis l'ouest (au nord de Portal Creek) traversant la route 93A. Le front de flamme profond et l'afflux d'air d'est vers la colonne de convection principale de l'incendie sont caractéristiques d'un comportement d'incendie dominé par le panache. La force convective extrême a probablement contribué à l'étendue des chablis causés par l'incendie et observés dans les environs par la suite (**Figure 18D**). Regardant vers le sud depuis près du Premier Lac en direction du pont de la route 93 traversant la rivière Athabasca. **E**, à 14 h 32, un comportement de l'incendie de cime et une colonne de fumée bien développée ont été observés au fond de la vallée et sur les pentes subalpines inférieures. La photo a été prise depuis les portes d'accès de la route 93, en direction du sud.

ravagés par le dendroctone (Section 2.4) a considérablement réduit les charges de combustibles et l'intensité des incendies dans les campings Wapiti et Whistlers (Section 5.2).

À 17 h 2, les observations du camping Wapiti ont suggéré que le front du complexe d'incendies s'était divisé en deux têtes distinctes : l'une se déplaçant vers le

nord-ouest le long de la base des Whistlers en direction du lotissement urbain de Jasper, et l'autre le long de la base de la montagne Signal, se dirigeant vers le Jasper Park Lodge. Les sections suivantes (intervalles 5.2 et 5.3) détailleront la progression du complexe d'incendies et le comportement observé des fronts du nord-ouest et du nord-est des feux.



Figure 18. Comportement d'incendie et effets pendant l'Intervalle 5.1 du complexe d'incendies de Jasper, 24 juillet (suite). **A**, À 14 h 57, un comportement d'incendie de cime intermittent avec un panache bien développé a été observé au front du South Fire et à l'est des campings Wapiti et Whistlers. La caméra est orientée nord-ouest. **B**, Comportement continu d'incendie de cime au front de l'incendie à 16 h 55. Le front de l'incendie est situé au sud du terrain du camping Wapiti le long de l'autoroute 93 et à l'est de la rivière Athabasca près de la vallée de cinq lacs. La caméra est orientée sud-est. **C**, Un incendie de cime intermittent avec un panache bien développé est observé au front de l'incendie à 17 h 2. Le front de l'incendie est au sud et à l'est des terrains des campings Wapiti et Whistlers. La caméra est orientée vers l'ouest. **D**, Séquelles d'un incendie provoqué par un panache rotatif et des vents extrêmes induits par l'incendie, photographiées le 3 août. Il y a près de 100 % de rupture d'arbres et d'écorçage près du camping Wabasso. La caméra est orientée vers l'ouest.

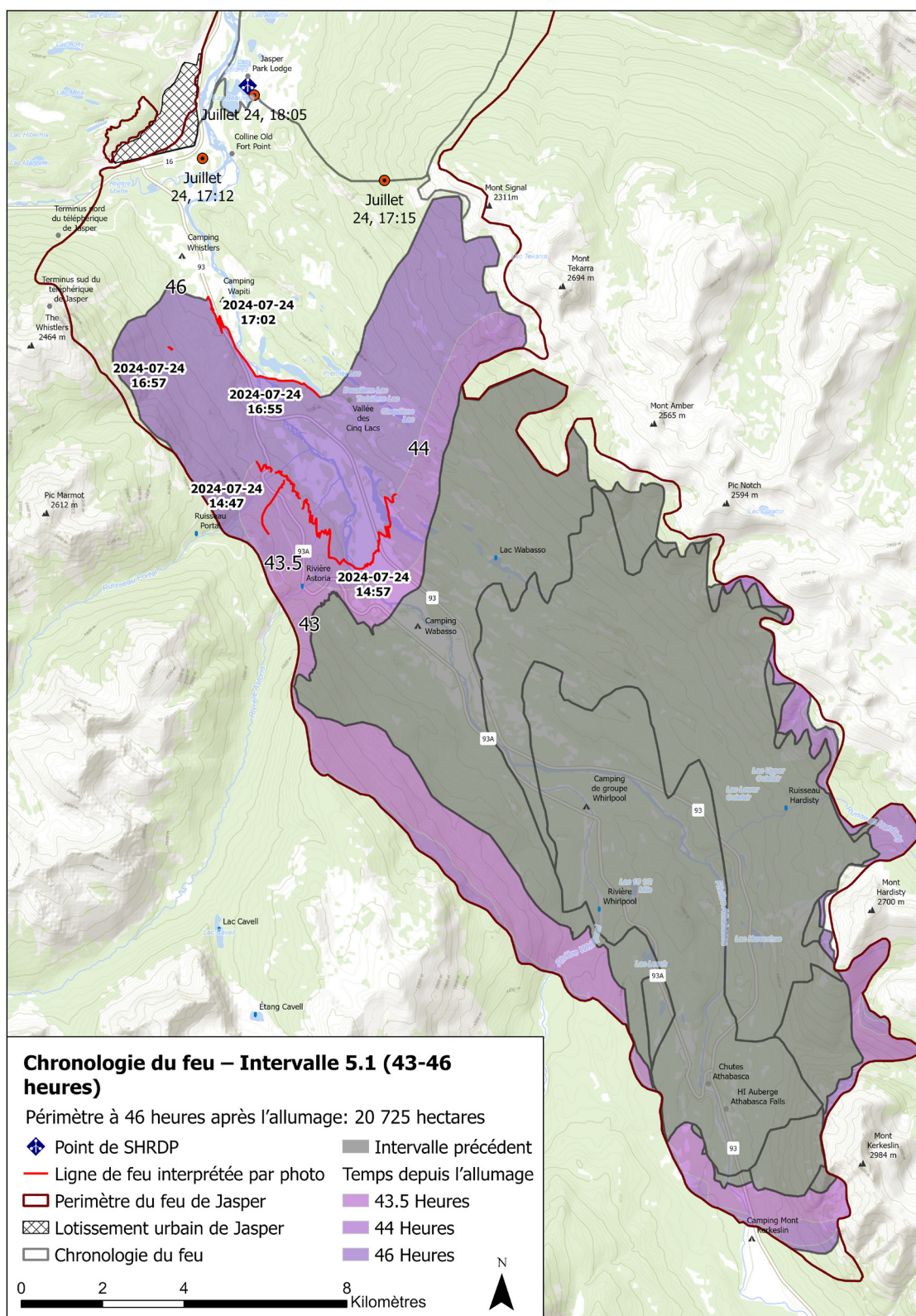


Figure 19. Carte de propagation d'incendie pendant l'Intervalle 5.1 le 24 juillet. La cartographie de la ligne d'arrêt à partir de la photogrammétrie est basée sur la **Figure 17C** (14 h 47), la **Figure 17D** (14 h 57), la **Figure 18A** (16 h 57), la **Figure 18B** (16 h 55) et la **Figure 18C** (17 h 2).

4.6.2 Intervalle 5.2 : Propagation nord-ouest vers le site du lotissement urbain de Jasper 17 h à 19 h

Des opérations d'allumage aérien ont été menées à l'aide d'un distributeur de sphères en plastique déployé par hélicoptère [71] de 16 h 40 à 17 h 10 afin de diriger l'incendie vers les Whistlers, loin du lotissement urbain de Jasper (Annexe B7). À 17 h 9, le front de l'incendie nord-ouest a été observé en train de se propager sur les pentes de Whistlers, suivant la pente de 27 % et l'orientation nord-est. Le périmètre de l'incendie à la fin de l'Intervalle 5.2 est montré dans la **Figure 20**. En appliquant la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt [5], l'interaction entre les vents légers du sud-est soufflant en travers de la pente à environ 15 km/h et la pente raide a probablement dirigé l'incendie vers le nord-ouest (310°) en direction du Jasper SkyTram, plutôt que vers le nord en direction du lotissement urbain de Jasper.

Le personnel de lutte contre les incendies dans le lotissement urbain de Jasper a observé l'arrivée de fumée au niveau du sol et les premiers tisons à 17 h 30. Alors que l'incendie approchait de la base du téléphérique à 17 h 36, il était influencé par des vents d'ouest provenant du col Yellowhead, ralentissant la propagation de l'incendie vers l'ouest; une activité d'incendie intense a été observée depuis la base de Whistlers à 1150 m jusqu'à la fin des combustibles continus à la limite des arbres à 1900 m.

La colonne de convection au front nord-ouest de l'incendie s'est effondrée vers 17 h 40 à 17 h 45 (**Figure 21A**). Plusieurs facteurs sont considérés comme ayant contribué, notamment (1) les vents de vallée convergents (venant du sud depuis la vallée de l'Athabasca et de l'ouest depuis le col Yellowhead), (2) l'attraction vers le haut dû aux pentes abruptes, et (3) la fin des combustibles continus au-dessus de la limite des arbres sur les Whistlers. L'effondrement de la colonne a produit une épaisse fumée continue au niveau du sol et de forts vents du sud-ouest, mais de courte durée, sur le lotissement urbain de Jasper à partir de 17 h 45. La visibilité est tombée à moins de 100 m, ce qui a entraîné l'allumage des réverbères en raison de l'obscurité soudaine (**Figure 21B**). Cet événement a probablement aussi accéléré l'arrivée des tisons dans le lotissement urbain de Jasper, mais le moment et l'emplacement exacts sont inconnus. La visibilité est tombée à moins de 100 m, provoquant l'allumage des réverbères en raison de l'obscurité soudaine. De forts vents ont cassé des branches de grands arbres à feuilles caduques, suggérant des rafales atteignant jusqu'à 110 km/h. Des épinettes matures abattues mais non brûlées, situées dans des zones résidentielles, témoignent de vents plus forts

dans certaines parties du lotissement urbain. Les arbres déracinés par le vent étaient alignés de manière cohérente, suggérant un vent rectiligne plutôt que le motif rotationnel observé à 14 h près du terrain du camping Wabasso. L'origine de ces vents intenses, accompagnés de fumée au niveau du sol, est incertaine, étant donné que la fumée est normalement élevée par la convection intense du feu. Les premiers foyers secondaires et les allumages des structures ont été documentés dans le lotissement urbain de Jasper à 18 h, avec des débuts d'incendie ayant leur origine sur les toits. Les vents se sont calmés à 18 h 5, bien que de la fumée dense soit restée jusqu'à environ 18 h 45 (**Figure 21A**).

Des épisodes de vent brefs mais intenses, causés par l'effondrement de la colonne de convection, ont été documentés lors d'incendies survenant dans des conditions de vent faible [72]. Ces phénomènes se produisent lorsque des masses de fumée, plus lourdes que l'air, descendent à la suite d'une diminution soudaine de l'intensité de l'incendie [73]. Bien que généralement associés au transport des tisons, de tels événements sont mal représentés dans les modèles de transport de tisons, qui supposent une convection stable [74]. Des simulations de dynamique des fluides d'incendies de forêt similaires suggèrent que les effondrements de colonne peuvent générer des vitesses de vent horizontales allant jusqu'à 72 km/h, même à 2 à 3 km du bord de l'incendie [75]. Cela s'aligne avec les observations de branches cassées et de feux disséminés près du bâtiment administratif du parc national Jasper, à 2,5 km du périmètre actif de l'incendie au terrain du camping Whistlers. Des dommages causés par le vent ont également été observés sur la route du Lac-Pyramid et à l'hôtel Forest Park, même si ces secteurs n'ont subi aucun impact direct de l'incendie.

À 18 h 15, les vents de surface du col Yellowhead ont diminué, comme observé à l'ouest de Jasper le long de la route 16. Avec l'affaiblissement des vents d'ouest, l'incendie se serait probablement déplacé vers le nord à partir du terrain de camping Whistlers, traversant la rivière Miette, la route 16 et les voies ferrées du Canadien National. Les traitements des combustibles à la limite du lotissement urbain, entre l'autoroute 16 et les voies ferrées, ont probablement réduit l'intensité d'incendie, faisant passer l'incendie d'un incendie de cime actif de classe d'intensité 6 à un incendie de surface vigoureux de classe d'intensité 4 [63]. Cette transition est évidente à la fois par la moindre cime impliquée dans les zones traitées ainsi que par une consommation de combustible réduite et une gravité globale moindre dans les parcelles de consommation de combustibles traitées (Section 2.4 et Section 5). Les incendies de surface, bien que moins destructeurs que les incendies de cime, peuvent tout de même produire des longueurs de flamme de 2 à

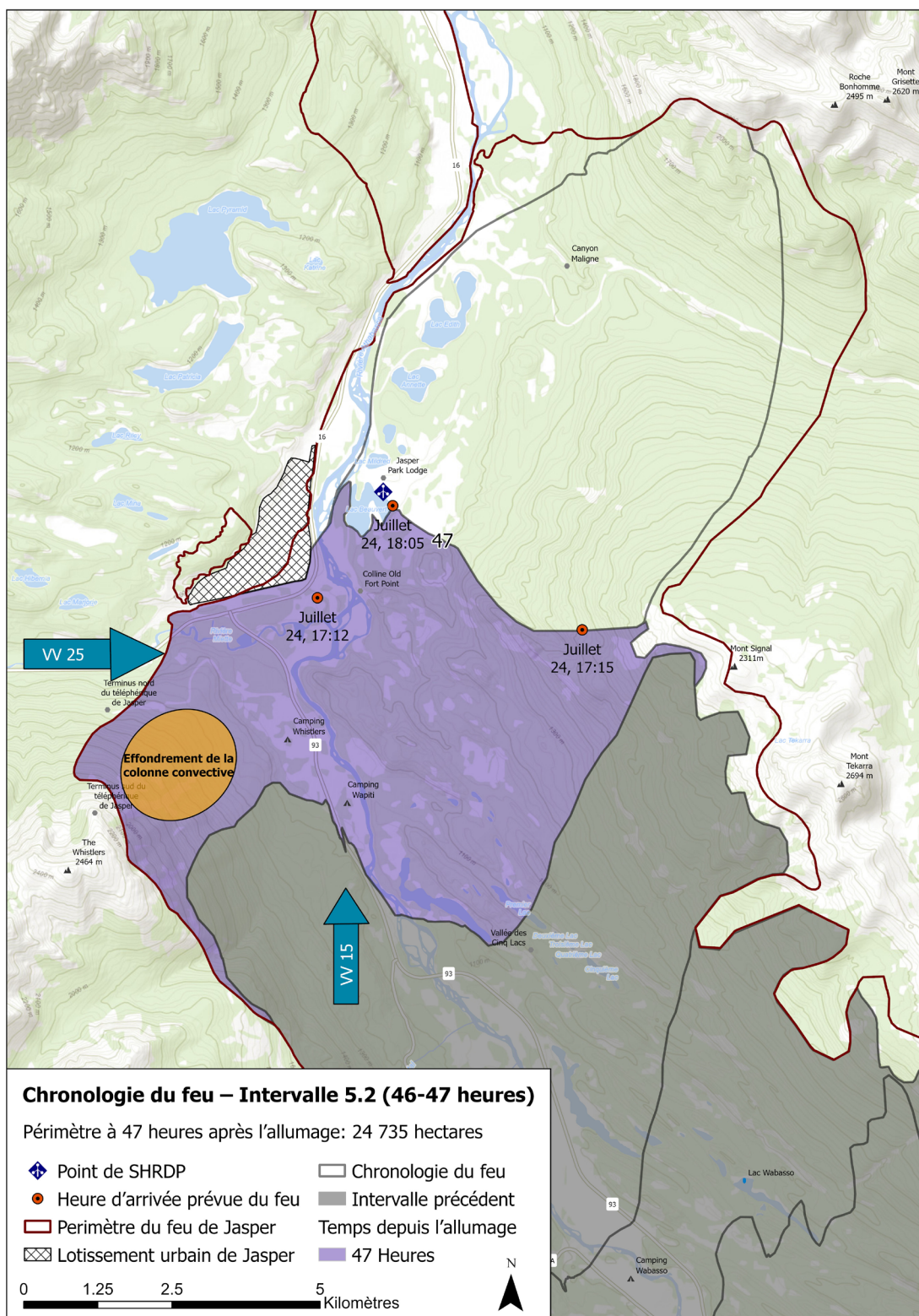


Figure 20. Carte de propagation d'incendie pendant l'Intervalle 5.2 le 24 juillet. Points d'arrivée estimés basés sur les observations discutées à la Section 4.6.3.

4 m, libérer des tisons et provoquer l'allumage des structures. Cependant, la production de tisons et la distance de propagation lors des incendies de surface [76] sont beaucoup plus faibles que lors des incendies de cime [77], ce qui réduit le risque d'exposition pour les structures éloignées.

Les quartiers au nord du Centre d'information de Jasper et de l'hôpital ont peut-être été épargnés grâce à la proximité de la gare ferroviaire du Canadien National à l'est et aux pentes abruptes de la terrasse Pyramid, qui ont toutes deux limité la propagation d'incendie sous l'effet des vents du sud-ouest. À 19 h 2, un comportement d'incendie de classe d'intensité 4 à 5 [63] a été observé sur le flanc de la colline de la terrasse Pyramid près de la rue Bonhomme et de l'avenue Miette. Étant donné les incendies de structure intenses à proximité, les allumages sur le Plateau Pyramid ont probablement été causés par une combinaison de transport de tisons (>1 km) sur de longues distances et de tisons produits par des structures en feu à proximité, un processus qui a été documenté de nombreuses fois dans des incendies d'intensité similaire [78], [79].

4.6.3 Intervalle 5.3 : Propagation vers le nord-est en direction du canyon Maligne 17 h à 23 h

Les photos du comportement d'incendie pour cet intervalle sont montrées dans la **Figure 21**. Une carte de la progression de l'incendie à la fin de cet intervalle (24 juillet 23 h) est présentée dans la **Figure 22**. À 17 h 12, le front nord-est de l'incendie s'étendait en ligne depuis la boucle de la Colline-Old Fort Point vers l'est jusqu'à la lisière des arbres près de l'ancienne tour de feu sur le mont Signal. Comparé à la position antérieure du front de l'incendie près du cinquième lac à 12 h 54, cela représente une propagation vers le nord de 7 km sur une période de 4,25 heures – soit un taux de propagation de 1,6 km/h (27 m/min). Le comportement d'incendie de classe d'intensité 6 [63] a été observé pendant toute cette période.

Des opérations d'allumage aérien ont été menées à la base du mont Signal pour exploiter les vents d'ouest provenant du col Yellowhead afin de diriger le front principal de l'incendie vers le nord-nord-est, dans le but d'éviter tout contact direct du front de l'incendie avec le Jasper Park Lodge (Annexe B7). À mesure que l'incendie progressait vers le nord-est depuis Old Fort Point, il a rencontré d'étendues importantes de combustibles moins inflammables, notamment des peuplements de trembles et des pentes sud peu végétalisés dans les fonds de vallée à l'est d'Old Fort Point. Ces types de combustibles ont probablement réduit la vitesse de propagation et l'intensité

d'incendie par rapport aux peuplements de pin tordu latifolié affectés par le dendroctone du pin ponderosa (DPP) ou à d'autres types forestier de conifères. Cependant, malgré des longueurs de flammes et des vitesses de propagation réduites dans les peuplements de trembles et les zones traitées, aucun de ces types de combustibles n'a complètement arrêté la propagation de l'incendie. Les traitements de réduction de combustibles autour du lac Beauvert, près du lieu historique de la maison Henry, ont réduit la charge de combustibles en cime et l'intensité de l'incendie.

À 18 h 5, l'incendie a atteint le Jasper Park Lodge, situé à environ 1,6 km d'Old Fort Point, avec une vitesse de propagation de 1,6 km/h (27 m/min), similaire à celle observée depuis 13 h. L'impact de l'événement venteux observé sur le lotissement urbain de Jasper de 17 h 45 à 18 h sur la propagation dans ce secteur de l'incendie est inconnu. Au Jasper Park Lodge, les allées du parcours de golf et l'éclaircie importante des peuplements autour du parcours ont probablement contribué à la réduction de la fraction brûlée de cime observée dans les zones traitées par rapport à la forêt non gérée plus loin de la ville et des infrastructures touristiques.

Le front de l'incendie continuait de se propager vers le nord-nord-est en direction du Skyline Trail et du canyon Maligne. Un comportement du feu moins intense sur les flancs, de classe d'intensité 4 à 5 [63], a été observé dans le corridor reliant le Jasper Park Lodge au lac Edith. Une intensité de feu de classe 4 à 5 avec une cime intermittente [63] a également été observée à 20 h 45 au pont Moberly sur la rivière Athabasca, au nord du lac Edith, indiquant une propagation continue vers le nord-nord-est alors que les vents du sud de la vallée de l'Athabasca (la station de Tangle a signalé des vents sud-sud-ouest de 14 km/h, avec des rafales allant jusqu'à 27 km/h à 20 h) se mélangeaient avec des vents d'ouest venant du col Yellowhead en Colombie-Britannique.

Le front de l'incendie a continué de se propager vers le nord-nord-est en direction du point de départ du sentier Skyline et du canyon Maligne. Un comportement d'incendie moins intense, de classe d'intensité 4 à 5 [63], a été observé sur les flancs, dans le corridor entre le Jasper Park Lodge et le lac Edith. Un incendie de classe d'intensité 4 à 5 avec un embrasement de cimes intermittent [63] a également été observé à 20 h 45 au pont Moberly sur la rivière Athabasca au nord du lac Edith, indiquant une propagation continue vers le nord-nord-est alors que les vents sud provenant de la vallée de l'Athabasca (la station de Tangle a signalé des vents sud-sud-ouest de 14 km/h, avec des rafales allant jusqu'à 27 km/h à 20 h) se mélangeaient avec des vents d'ouest venant du col Yellowhead en Colombie-Britannique.

À 20 h 48, l'incendie s'était propagé sur 6 km vers la base de la montagne Roche Bonhomme et du mont Grisette, au nord du canyon Maligne, près du sixième pont, avec un taux de propagation de 2,2 km/h (36 m/min). Des pentes de 20° (32 %) devraient doubler la

vitesse de propagation de l'incendie lorsqu'il progressait du Maligne Canyon Hostel en montée vers la limite des arbres, avant une augmentation rapide de l'humidité et des précipitations entre 22 h et 23 h le 24 juillet, ce qui a arrêté la propagation de l'incendie ce jour-là.



Figure 21. Comportement de l'incendie pendant les intervalles 5.2 et 5.3 du complexe d'incendies de Jasper, 24 juillet. **A**, L'effondrement de la colonne de convection et la rafale descendante, observés depuis la route 16 à l'ouest du lotissement urbain de Jasper à 17 h 41. La caméra est orientée vers l'est. **B**, Une épaisse fumée et de mauvaises conditions de visibilité se sont produites pendant et après l'effondrement de la colonne de convection, photographié dans le lotissement urbain de Jasper à 18 h 20. **C**, Un incendie de cime intermittent à continu avec un panache bien développé a été observé à 20 h 45 sur le flanc de l'incendie situé entre le lac Edith et le lac Annette. La caméra est orientée vers l'est. **D**, Un incendie de cime continu a été observé à 20 h 48 au flanc de l'incendie situé environ 2 km au nord-est du lac Edith. La caméra est orientée sud-est.

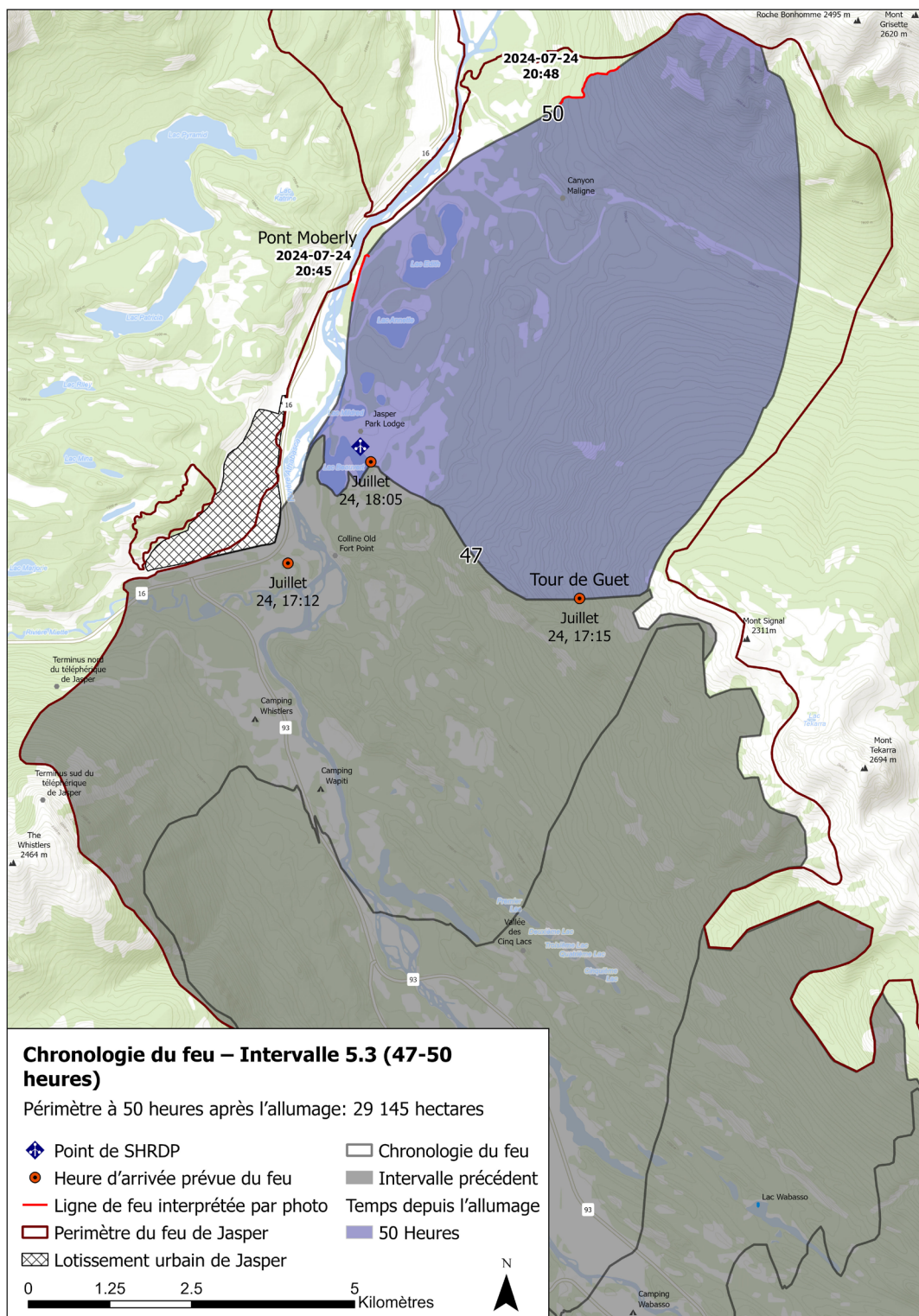


Figure 22. Carte de progression d'incendie pendant les Intervalles 5.2 et 5.3 (17 h – 23 h) le 24 juillet. Cela montre la propagation au nord-est du front de l'incendie. Les points d'arrivée estimés de l'incendie sont basés sur les observations discutées à la Section 4.6.3. Cartographie du périmètre à partir des instruments VIIRS et MODIS et monoplantage à l'aide de photographies prises à 20 h 45 (**Figure 21**) et 20 h 48 (**Figure 21D**).

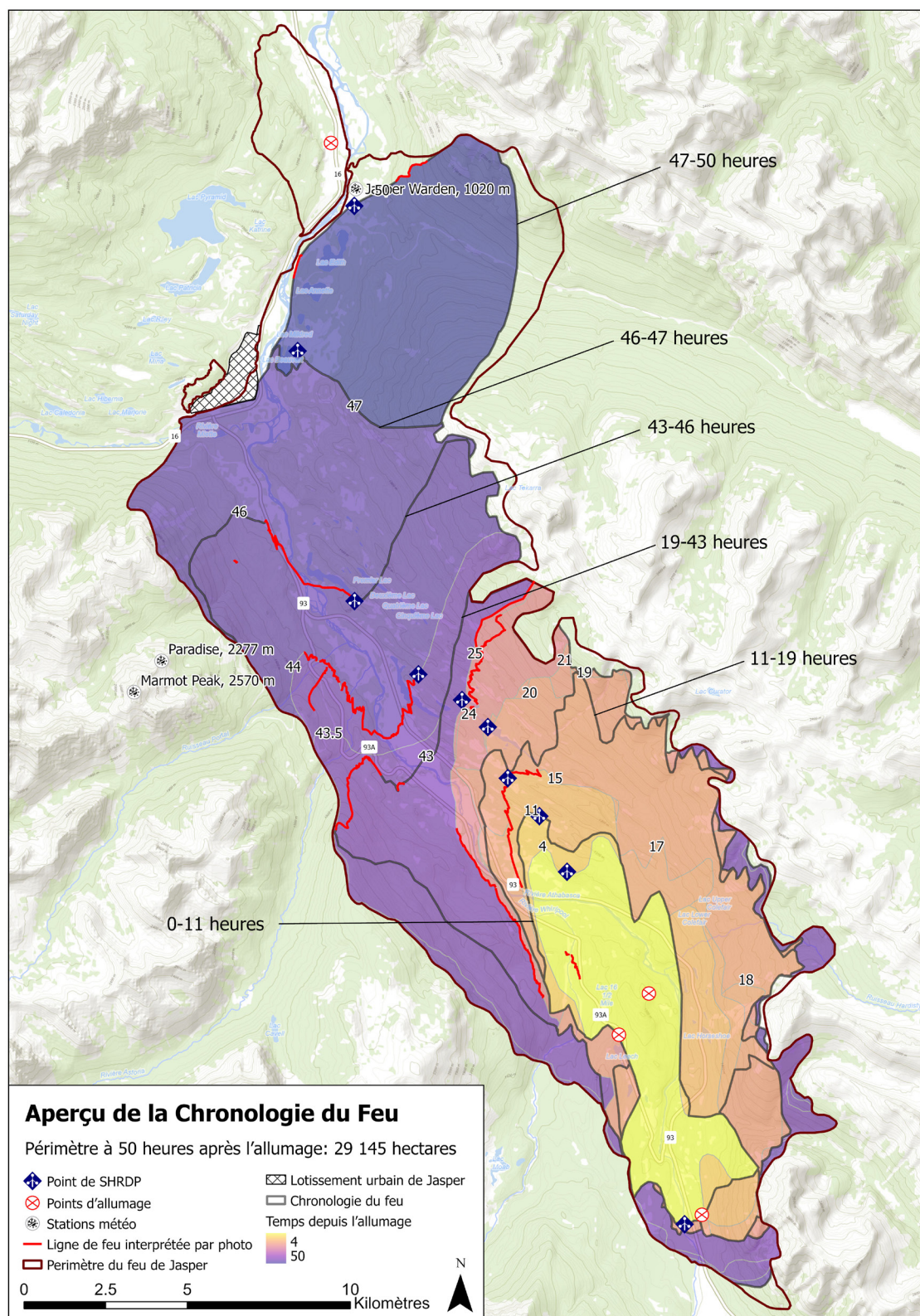


Figure 23. Carte complète de progression des incendies pendant les Intervalles 1 à 5 du complexe d'incendies de Jasper, du 22 au 24 juillet 2024. La superficie à l'intérieur du périmètre du South Fire a été estimée à environ 29 145 ha, 50 heures après l'allumage, tard dans la soirée du 24 juillet.

5. Sévérité et analyse du comportement de l'incendie

5.1 Sévérité d'incendie

La sévérité d'incendie est un attribut important des incendies de végétation qui quantifie les impacts des incendies sur la végétation et le sol, qui peuvent varier considérablement en fonction du comportement d'incendie et des caractéristiques écologiques [9]. En pratique, la sévérité d'un incendie est souvent mesurée comme le degré de changement de la biomasse et de la couverture terrestre basé sur des mesures avant et après un incendie. En plus de la consommation de biomasse, ces changements incluent le brûlage du feuillage et la mort immédiate des tiges et branches ligneuses [80]. La mesure exhaustive de la sévérité des incendies à travers de vastes incendies de végétation nécessite l'utilisation de satellites d'observation de la Terre avec une résolution modérée (10–30 m), comme ceux de la série *Landsat* ou des missions *Sentinel-2*. Des recherches antérieures ont montré que les méthodes basées sur satellite utilisant la différence normalisée du ratio de brûlage (dNBR) étaient efficaces pour évaluer les mesures de sévérité d'incendie dans les Rocheuses canadiennes, y compris le parc national Jasper [81]. L'analyse immédiate de la sévérité après l'incendie sur l'incendie Jasper Sud a été réalisée à l'aide des images de *Sentinel-2*. Les méthodes détaillées sont décrites dans l'annexe A3.

La majeure partie de la zone de l'incendie a été classée comme de sévérité extrême (52 %) et élevée (27 %), indiquant une mortalité étendue de la canopée et une perte de couverture. Les zones non brûlées et celles de faible sévérité, indiquant une consommation réduite de biomasse et pouvant offrir des refuges pour la végétation et la faune, représentaient environ 12 % de la superficie du complexe d'incendies. (**Figure 24**). Une analyse récente des modèles de sévérité des incendies pour les forêts de la Cordillère montagnarde en Colombie-Britannique de 1985 à 2021 suggère que la sévérité du complexe d'incendies de Jasper était comparable à celle

d'autres incendies extrêmement étendus (c'est-à-dire les 5 % les plus grands des incendies, ceux de plus de 7 500 ha) dans les régions montagnardes de l'ouest du Canada (L. Collins, données non publiées). Cependant, nous notons que les différences dans l'imagerie satellitaire (c'est-à-dire la série *Landsat* contre *Sentinel-2*), les approches de cartographie de la sévérité d'incendie (c'est-à-dire une année avant l'année suivant la différence de l'incendie contre l'année précédente), et l'étendue géographique (c'est-à-dire la Colombie-Britannique contre l'Alberta) limitent les comparaisons directes. De plus, les grandes zones de forêts touchées par l'épidémie de DPP avant l'incendie ont pu être mal classées, car les méthodes fondées sur la dNBR ne différencient pas bien la sévérité d'incendie dans les peuplements affectés par une perturbation antérieure [82].

L'examen des schémas de sévérité de l'incendie au sein des intervalles chronologiques (Section 4) a montré que la gravité extrême de l'incendie était répandue pendant les 50 premières heures de l'évolution de l'incendie (c'est-à-dire les Intervalles 1 à 5), représentant plus de 45 % de la superficie brûlée pendant chaque intervalle examiné (**Tableau 5**). La sévérité extrême des incendies était la classe de sévérité la plus répandue pendant les Intervalles 2 et 5, représentant de 54 % à 60 % de la superficie du complexe d'incendies. Les zones qui ont brûlé dans les jours suivants (c'est-à-dire après l'Intervalle 5) ont affiché des motifs de brûlage plus hétérogènes, avec des zones connaissant une sévérité d'incendie extrême (32 %) et élevée (16 %), et environ 40 % connaissant une faible sévérité d'incendie avec un impact minimal sur la canopée d'arbres (**Tableau 5**).

La sévérité des incendies est également abordée dans le contexte des traitements de réduction du risque à la Section 5.2.2.

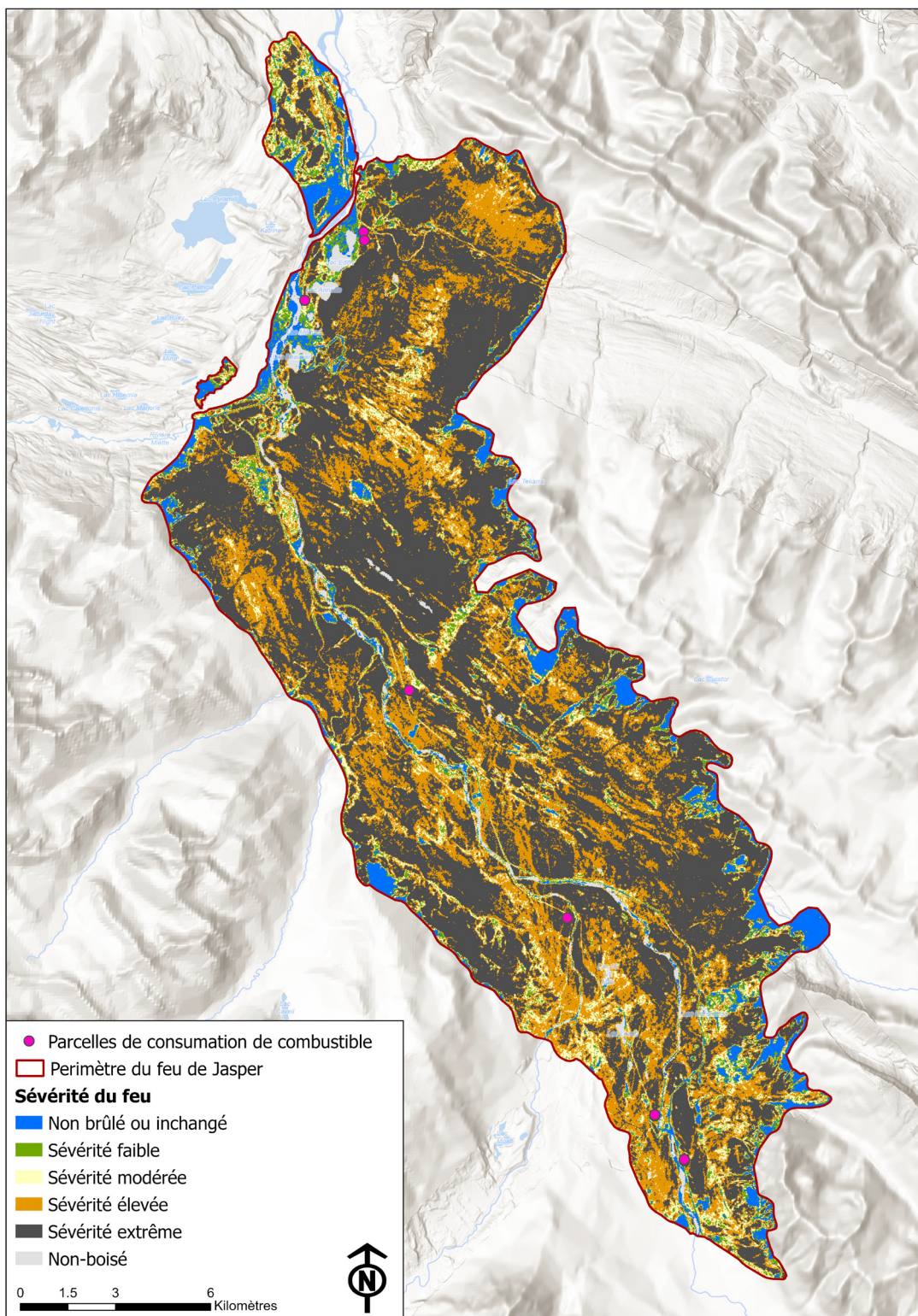


Figure 24. Cartographie de la sévérité d'incendie pour le complexe d'incendies de Jasper avec les emplacements des parcelles de consommation de combustible. Les cartes de sévérité des incendies ont été produites à l'aide d'images Sentinel-2 (résolution de 20 m).

Tableau 5. Répartition des classes de sévérité des incendies par intervalle chronologique à l'intérieur du périmètre cartographié du complexe d'incendies de Jasper, 2024

	Intervalles ^a						Après l'Intervalle 5	Portée complète
	1	2	3 et 4	5,1	5,2 ^b	5,3 ^b		
Zone touchée (ha)	3 548	5 023	5 149	7 005	4 010	4 410	3 136	32 281
Classe de sévérité des incendies								
Non brûlé ou inchangé	2,1	4,0	6,5	7,7	4,7	2,6	26,2	7,0
Faible	3,2	4,3	4,8	4,4	5,0	3,8	13,6	5,2
Modérée	7,9	6,9	9,4	8,1	7,4	6,2	12,5	8,1
Élevée	35,9	27,3	33,4	25,8	22,5	28,5	16,1	27,3
Extrême	50,9	57,4	45,9	54,0	60,3	58,8	31,6	52,4

^a Les intervalles sont décrits à la Section 4. Les intervalles 3 et 4 sont regroupés en raison de la faible superficie touchée durant l'intervalle 4.

^b Confiance réduite quant au moment de l'arrivée de l'incendie et à la superficie touchée.

5.2 Analyse de terrain du comportement d'incendie

5.2.1 Parcelles d'évaluation rapide et efficacité des traitements des combustibles

Lors de la campagne de terrain du début août 2024, 247 parcelles d'évaluation rapide ont été évaluées à l'intérieur du périmètre de l'incendie (**Figure 25A**). Dans les parcelles d'évaluation rapide, des techniques d'enquête sur les incendies ont été utilisées pour identifier la direction de la propagation du complexe d'incendies, tandis que des estimations ont été faites concernant l'implication globale des combustibles de la cime et la hauteur de carbonisation.⁵ Ces techniques d'investigation suivaient les méthodes reconnues internationalement pour déterminer la direction de propagation d'incendie en utilisant 1 ou plusieurs des 11 indicateurs de motifs de feu (protection, tige d'herbe, gel du feuillage, angle de carbonisation, éclatement, courbure, suie, tache, dépôts de cendres, bombement, et motif en V) [84]. Des emplacements de parcelles précis ont été sélectionnés à partir d'une grille de 100 × 100 m et établis à 50 m ou plus des routes. Les parcelles d'évaluation rapide ont été largement établies à travers le périmètre d'incendie, y compris un suréchantillonnage dans les traitements de réduction des risques (Section 2.4). Lorsque possible, des parcelles jumelées ont été établies à

l'intérieur et à l'extérieur des zones ayant subi des traitements de combustible afin d'évaluer l'influence de ces traitements sur le comportement de l'incendie.

Les traitements de réduction du risque ont été décrits précédemment à la Section 2.4. La **Figure 25B** montre les traitements de réduction des risques superposés aux catégories de sévérité des incendies près du lotissement urbain de Jasper. L'inspection visuelle suggère que les niveaux de sévérité étaient plus faibles dans la plupart des polygones de traitement par rapport aux zones non traitées, bien que certaines zones de traitement plus anciennes aient encore soutenu des niveaux de sévérité élevés et extrêmes.

5.2.2 Implication estimée des combustibles de cime

Selon la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, la fraction brûlée des cimes (FBC) est définie comme la proportion prévue de la canopée impliquée et consommée lors d'un incendie. [5]. La proportion de la FBC définit le type d'incendie comme étant soit de surface (FBC de 0 %–9 %), soit de cime intermittent (FBC de 10 %–89 %), soit incendie de cime continu (FBC de ≥90 %) [5]. La FBC est un indicateur utile du comportement et la sévérité d'incendie, car elle décrit un gradient de combustion des combustibles de la cime et de leur contribution à l'intensité d'incendie. Dans le contexte de l'évaluation

⁵ À noter que la hauteur de carbonisation se réfère à la noirceur visible sur les troncs et les branches et représente le mieux la hauteur des flammes lors d'incendies de surface; la consommation de la cime correspond à la combustion réelle de la biomasse de la cime, en unités réelles ou relatives. Pour les détails, voir [83].

des traitements des combustibles, une valeur FBC plus basse indique une réduction de l'implication de la cime, une réduction de la consommation de combustible de la cime et une réduction de l'intensité d'incendie; ainsi, une valeur FBC plus basse indique un succès accru des traitements des combustibles dans l'atténuation du comportement des incendies de végétation.

La hauteur de carbonisation est un facteur secondaire dans la détermination de l'efficacité des traitements des combustibles car elle fournit des informations sur l'intensité de la ligne d'arrêt, la hauteur des flammes et la survie des arbres après exposition à un incendie de surface. La hauteur de carbonisation du tronc est définie comme la hauteur au-dessus du sol jusqu'à la noirceur visible de l'écorce et à la consommation des tissus de végétation, y compris les aiguilles ou les feuilles dans la cime des forêts de conifères; elle est inférieure à la hauteur létale de brûlure [85]. Lors de l'évaluation des traitements des combustibles, les hauteurs inférieures de carbonisation du tronc et les hauteurs de brûlure de la cime indiquent des niveaux d'intensité d'incendie, des longueurs de flamme et une mortalité des arbres plus faibles, et reflètent le succès des traitements des combustibles pour réduire à la fois la connectivité verticale et horizontale des combustibles. Parce que la FBC et la hauteur de carbonisation du tronc n'a été que visuellement estimée (une estimation oculaire a été faite par 2 observateurs formés), les valeurs de précision de ces mesures devraient être au mieux modestes. L'objectif de ces évaluations était d'évaluer rapidement une grande partie de la zone d'incendie. En revanche, les évaluations de la sévérité des incendies (décrites ci-dessus) et de la consommation de combustible (décrite ci-dessous, Section 5.2.3) étaient plus objectives, mais elles étaient soit beaucoup plus longues à réaliser et dépendantes de quelques parcelles préincendie (consommation de combustible), soit plus

difficiles à interpréter en l'absence de données de terrain (sévérité des incendies).

La FBC a été comparée parmi des peuplements de 3 groupes de traitement (N=247) à travers toutes les parcelles d'évaluation rapide (**Figure 26**). Les groupes de traitement consistaient en le groupe récent (années de traitement, 2017–2022; n=58), les anciens groupes (années de traitement, 2003–2011; n=48), et les non traités (n=141). Les valeurs médianes de la FBC pour le groupe récent étaient de 22 %; groupe ancien, 60 %; et groupe non traité, 90 %. Les différences entre les traitements ont été testées à l'aide d'un test Kruskal-Wallis suivi d'un test de comparaison par paires de Dunn. Le groupe non traité présentait des valeurs de FBC significativement plus élevées que les groupes récent et ancien, indépendamment de l'âge du traitement ($P<0.001$). Les différences étaient marginalement significatives ($P=0,08$) entre les groupes récent et ancien, avec une variabilité élevée évidente dans la FBC dans tous les groupes. De plus, les hauteurs de carbonisation du tronc ont été comparées entre les groupes de traitement (N = 188) (**Figure 27**). La hauteur médiane de carbonisation dans le groupe récent (n=49) était de 3 m; ancien groupe (n=41), 5 m; et groupe non traité (n=98), 9 m. Les hauteurs de carbonisation ont été testées entre les groupes de traitement (analyse de variance et essais de Tukey); le groupe non traité avait des hauteurs de carbonisation du tronc significativement plus élevées que le groupe traité, indépendamment de l'âge du traitement (groupe récent : $P<0.001$; ancien groupe : $P=0,03$). Les différences n'étaient pas significatives entre les groupes récent et ancien ($P=0.54$).

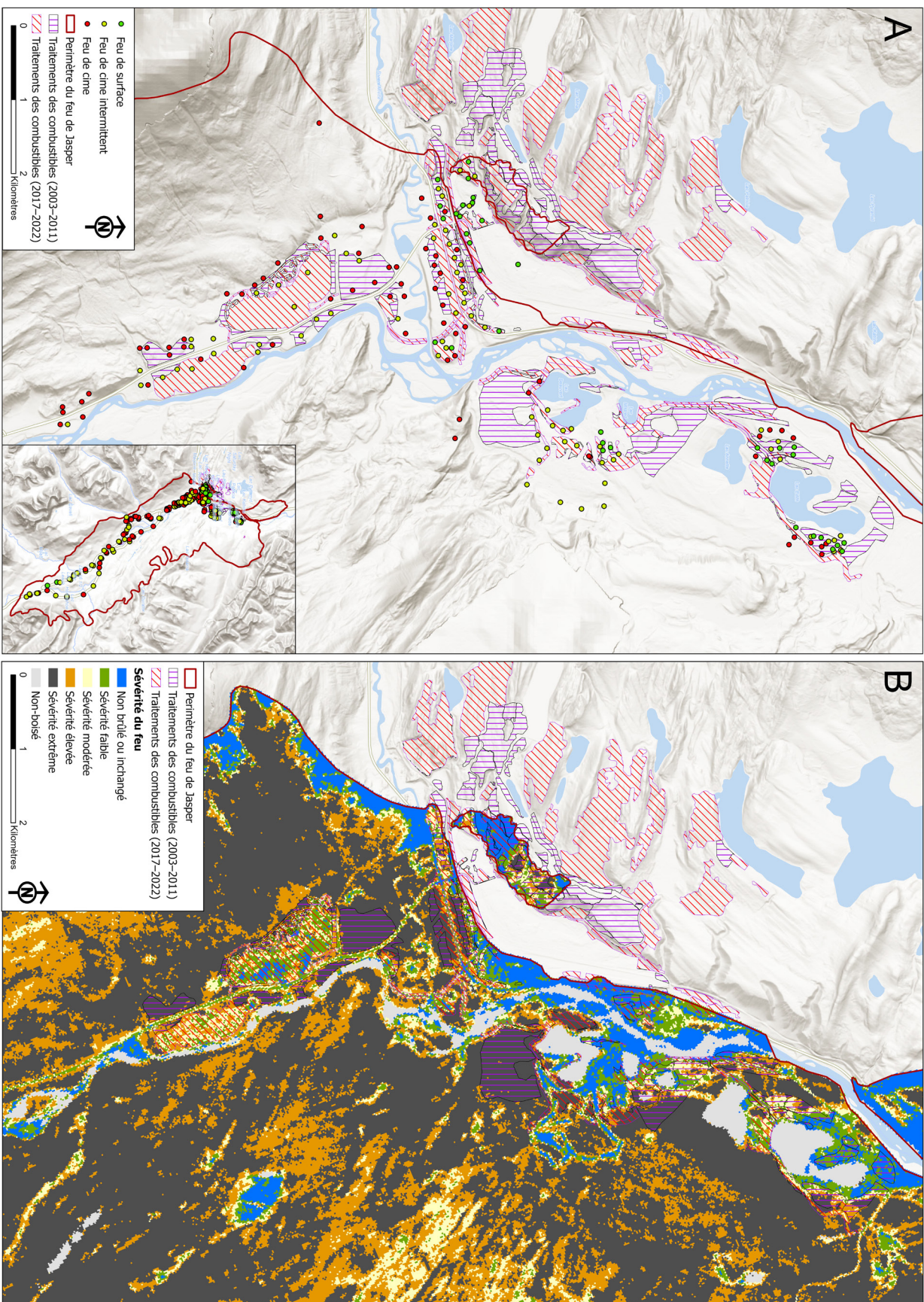


Figure 25. Traitements de réduction des risques et parcelles d'évaluation rapide à l'intérieur du périmètre du complexe d'incendies de Jasper lors de la campagne de terrain début août. **A.** Type d'incendie en fonction de la fraction brûlée de cime à partir des parcelles d'évaluation rapide à l'intérieur du périmètre du complexe d'incendies de Jasper et du milieu périurbain. **B.** La sévérité des incendies superposée aux traitements des combustibles près du lotissement urbain de Jasper. Les deux groupes de traitement étaient : ancien (années de traitement : 2003-2011) et récent (années de traitement : 2017-2022).

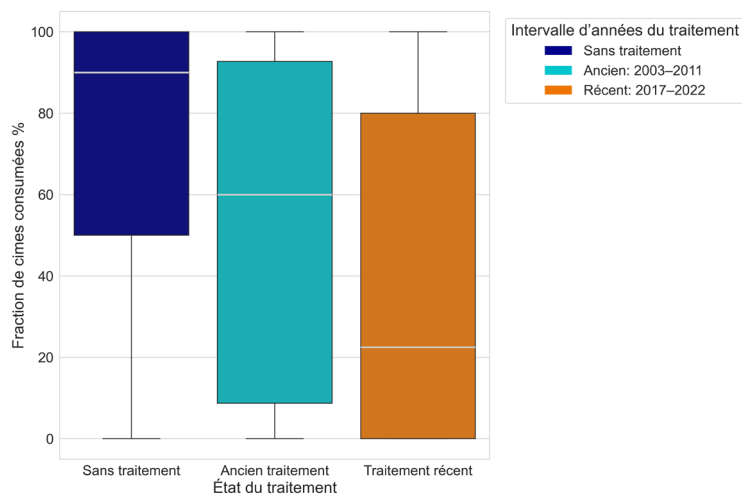


Figure 26. Répartition de la fraction brûlée de cime (%) selon les types de traitement dans le milieu périurbain du lotissement urbain de Jasper. Les lignes blanches indiquent les médianes de traitement, les boîtes indiquent l'intervalle interquartile, et les moustaches indiquent l'intervalle de confiance à 95 %. Les différences entre le groupe non traité et les groupes traités (récent et ancien) étaient significatives ($\alpha=0,05$).

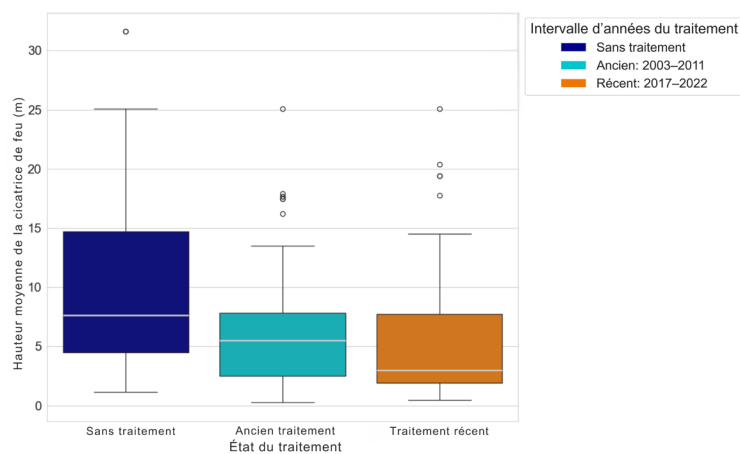


Figure 27. Répartition de la hauteur moyenne de carbonisation du tronc à travers les surfaces limites entre les terres non défrichées et les zones urbaines du lotissement urbain de Jasper. Les lignes blanches indiquent les moyens de traitement, les boîtes indiquent l'intervalle interquartile, les moustaches indiquent l'intervalle de confiance à 95 %, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes.

5.2.3 Consommation de combustible

Dans le cadre d'un projet réalisé avant l'incendie, des parcelles de végétation ont été mesurées de 2021 à 2023 afin de quantifier la végétation et la structure des combustibles dans la vallée de la haute Athabasca [86]. Ces graphiques se concentraient spécifiquement sur les effets du DPP (Section 2.2) et les traitements de réduction des risques (Section 2.4) entourant le lotissement urbain de Jasper. Par hasard, 18 parcelles préincendie ont été

brûlées lors de l'incendie South Fire; 11 d'entre elles ont été mesurées à nouveau en août 2024 pour quantifier la combustion de divers éléments du lit de combustible.⁶

Les méthodes détaillées sur le terrain et les calculs sont décrits à l'annexe A4. Nous avons répété l'approche d'échantillonnage et de mesure précédemment utilisée [86] pour faire correspondre les mesures post-incendie aussi précisément que possible aux données antérieures d'incendie. En résumé, la remesure du combustible

⁶ Comme indiqué à la Section 2, les parcelles prébrûlées ont été collectées par T. Skretting, E. Jones, L. Chasmer et leurs assistants de terrain à l'Université de Lethbridge, Département de Géographie. L'équipe de documentation est reconnaissante pour leur généreux partage de données et aide pour assister nos remesures.



Figure 28. Photo d'exemple de parcelle montrant une consommation extrême du combustible du complexe d'incendies de Jasper (parcelle JP11). Les chicots (arbres morts avant l'incendie) présentaient fréquemment une perte complète de la structure des branches et du tronc calciné en profondeur. Les réductions de densité d'environ 40 à 80 % indiquaient que de nombreux arbres morts avaient été presque complètement consommés, qu'ils soient restés debout ou après être tombés. Les coordonnées et les renseignements sur le roulement sont fournis par l'application Theodolite.⁷

impliquait d'évaluer les combustibles de surface dans chaque parcelle en utilisant des mesures d'intersection de ligne et des mesures de profondeur du sol forestier. Les combustibles de la canopée ont été évalués en échantillonnant d'abord les arbres de la couche supérieure à l'aide de mesures de distance. L'activité d'incendie de cime a été estimée en évaluant visuellement la consommation de cime et la hauteur de carbonisation.

La combustion de carburant de surface a été calculée comme la différence entre la couverture morte avant l'incendie et la charge de combustible boisé après l'incendie. La consommation des combustibles de la canopée a été compliquée par les pertes significatives de densité de la couche supérieure après l'incendie, où de nombreux arbres morts sont tombés et ont été partiellement ou totalement consommés. Bien qu'il soit inconnu si les arbres morts sont tombés avant d'être consommés en raison des vents causés par l'incendie (Annexe B10), ou s'ils ont été consommés en restant debout, le résultat est le même en termes de consommation totale de combustible (CTC) et d'intensité des incendies de tête calculée (Section 5.3). La perte de structure de branches et du tronc calciné en profondeur ont été fréquemment observées dans les arbres morts debout, comme l'avaient déjà rapporté des incendies dans le centre de la Colombie-Britannique. [87]. Les arbres qui étaient vivants avant l'incendie ont perdu leur feuillage et des branches

finies mais n'avaient pas de carbonisation profonde similaire (**Figure 28**).

La charge de combustible moyenne avant incendie du tapis forestier (litière et houppier inférieur) dans les 11 parcelles était de 4,8 kg/m², mais était très variable, allant de 2,7 kg/m² à 7,1 kg/m².⁸ La valeur moyenne était à peu près similaire aux valeurs des brûlages expérimentaux dans les forêts boréales, où les peuplements de pin gris et d'épinette noire avaient des valeurs moyennes de chargement de combustible du sol forestier de 3,3 kg/m² et 8,3 kg/m², respectivement [88]. La charge totale en combustibles de surface, incluant tous les débris ligneux (moyenne : excluant les traitements des combustibles, 9,0 kg/m²; traitements des combustibles, 5,2 kg/m²) était légèrement inférieur aux valeurs rapportées pour les parcelles du parc national de Banff à proximité ([89]; moyenne : non traité, 11,5 kg/m²; traité, 8,2 kg/m²).

⁷ Voir <https://theodolite.app>. Hunter Research and Technology LLC, tous droits réservés

⁸ Calculé à partir des données fournies par T. Skretting, E. Jones et L. Chasmer, Université de Lethbridge.

La consommation de combustible et les pertes de chicot sont résumées dans le **Tableau 6**, ainsi que le comportement global d'incendie et la classification de la gravité. Les classes ont été attribuées en fonction de la consommation de combustible (classées selon des regroupements naturels), la FBC et le type d'incendie [5], et réduction de densité (Nombre absolu de tiges/ha et %). Il y avait une large variation dans la CTC, ainsi que dans des mesures connexes telles que la FBC et la réduction de la densité de peuplement. La CTC moyenne parmi le groupe non traité était de 8,6 kg/m², ce qui incluait 6,2 kg/m² de consommation de combustible de surface et 2,4 kg/m² de consommation estimée de combustible ligneux en canopée et debout. Dans les 3 parcelles de traitement de réduction des risques, les valeurs moyennes de consommation de combustible de surface, de consommation de combustible de la canopée (y compris

la combustion de bois debout) et de la CTC étaient toutes inférieures aux valeurs de la forêt non traitée, à 3,3 kg/m², 1,4 kg/m² et 4,7 kg/m², respectivement. Cependant, ces moyennes masquent la variation entre les 3 parcelles de traitement de réduction des risques. Basé sur la combustion de combustibles et le comportement global estimé de l'incendie, deux parcelles de traitements des combustibles (JP21 et JP23) avaient des mesures de combustion beaucoup plus faibles et semblaient largement réussies à réduire l'activité d'incendie de cime; en revanche, une parcelle (JP20), le traitement le plus ancien (achevé en 2003), a subi une consommation de combustibles extrême (9,6 kg/m²) et un incendie de cime, avec 100 % de FBC estimé à partir des arbres échantillonnés et une réduction de 39 % de la densité de la canopée due à la combustion de souches debout.

Tableau 6. Consommation de combustibles, réduction de la densité, et type global de comportement d'incendie et classe de sévérité à partir de 11 parcelles de combustible détaillées. Les noms des parcelles de réduction des risques incluent l'année de traitement (FTYYYY).

	FFFC	CCLF	CCLG	CCLP	CCC	CTC	FBC	Type d'incendie	Perte de densité (/ha)	Perte de densité (%)	Sévérité globale ^a
Parcelles principales											
JP1	1,46	0,68	1,16	0,60	0,06	3,95	13	Int. Cime (<50)	189	42	Moyenne
JP2	4,69	0,69	1,42	1,98	0	8,80	0	Surface	710	65	Élevée
JP7	6,63	0,10	2,78	2,31	0,72	12,55	98	Cont. Cime	269	83	Extrême
JP8	7,03	0,06	0	0	0,38	7,47	88	Int. Cime (>50)	0	0	Moyenne
JP11	3,71	0,10	3,84	5,68	1,05	14,40	100	Cont. Cime	590	60	Extrême
JP12 ^b	3,91	0,15	1,38	2,79	1,41	9,64	100	Cont. Cime	542	52	Extrême
JP13	3,16	1,57	0,60	0,24	0,66	6,23	100	Cont. Cime	114	9	Élevée
JP14	1,11	1,02	2,51	1,29	0,03	5,96	4	Surface	494	51	Moyenne
Moyenne globale	3,96	0,55	1,71	1,86	0,54	8,62	62,9	S/O	363,4	45,1	Élevée
Parcelles de traitement											
JP20.FT2003	4,60	0,35	0,84	2,31	1,53	9,62	100	Cont. Cime	262	39	Élevée
JP23.FT2009	1,54	0,32	0	0	0,27	2,14	33	Int. Cime (<50)	0	0	Faible
JP21.FT 2022	1,84	0,33	0	0	0,04	2,21	2	Surface	0	0	Faible
Moyenne globale	2,66	0,33	0,28	0,77	0,61	4,66	44,9	S/O	87,3	12,9	S/O

Abréviations : FBC, fraction brûlée des cimes; CCC, consommation de combustible de cime; Cont., continu; FFFC, consommation de combustibles de surface; Int., intermittent; S.O., sans objet; CTC, consommation totale de combustible; CCL, consommation de combustible ligneux.

^a Voir le tableau ci-dessous pour les détails sur les classes de sévérité.

^b Valeur brute estimée de CCL grossier; la valeur mesurée était négative en raison de l'arrivée de nouveaux troncs d'arbres tombés provenant d'arbres morts debout.

Sévérité	Type d'incendie	Combustion du combustible	Perte de densité
Faible	Surface	<3	<50/ha ou <5 %
Moyenne	Cime intermittente <50 % de la FBC	3-7	50-200/ha ou 5 à 25 %
Élevée	Cime intermittente >50 % de la FBC	7-10	200 400/ha ou 25 %-50 %
Extrême	Cime continue	>10	400/ha ou >50 %

Les graphiques de consommation de combustible ont été superposés sur la carte de sévérité des incendies (Section 5.1) pour identifier les corrélations entre les mesures de sévérité basées sur la consommation de combustible et les catégories de sévérité détectées par télédétection. Bien qu'il n'y ait pas suffisamment de données pour les tests d'hypothèse, comme le montre la **Figure 29**, il y avait une corrélation modérément forte entre la sévérité d'incendie provenant du satellite et les valeurs de consommation de combustible détaillées, avec des parcelles à haute et extrême sévérité coïncidant avec des pixels de sévérité élevée et extrême, et des parcelles de classe à faible consommation de combustible (traitements des combustibles JP21 et JP23) coïncidant avec des classes de gravité faible à modérée. La relation n'est pas parfaite en raison de certaines incohérences apparentes : par exemple, les parcelles JP2 et JP14 ont été classées comme incendies de surface et de faible sévérité sur la base de valeurs FBC estimées de 0 % à 4 %, mais avaient une réduction de 50 % à 65 % de la densité des arbres debout, suggérant un comportement et une sévérité d'incendie extrêmes; et certaines parcelles dans les classes de combustion modérée et élevée et

de types d'incendie se sont retrouvées dans des pixels de sévérité extrême. Les résultats globaux suggèrent que la cartographie de la sévérité des incendies reflète avec précision les changements réels dans le complexe de combustible et de végétation en raison du comportement de l'incendie South Fire de Jasper.

Les calculs de l'intensité du front estimés ont utilisé la consommation du combustible moyenne finale de 8,6 kg/m² et la consommation de combustible maximale de 14,4 kg/m² (Section 5.3). Bien que la valeur maximale soit extrême, les quelques parcelles de combustion ne reflètent pas nécessairement les effets de l'incendie les plus sévères, où la consommation du combustible a même pu être plus élevée (par exemple, **Figure 18D**). La **Figure 30** montre des exemples supplémentaires de la sévérité de l'incendie et des niveaux de consommation variables observés à l'intérieur des zones des traitements des combustibles.

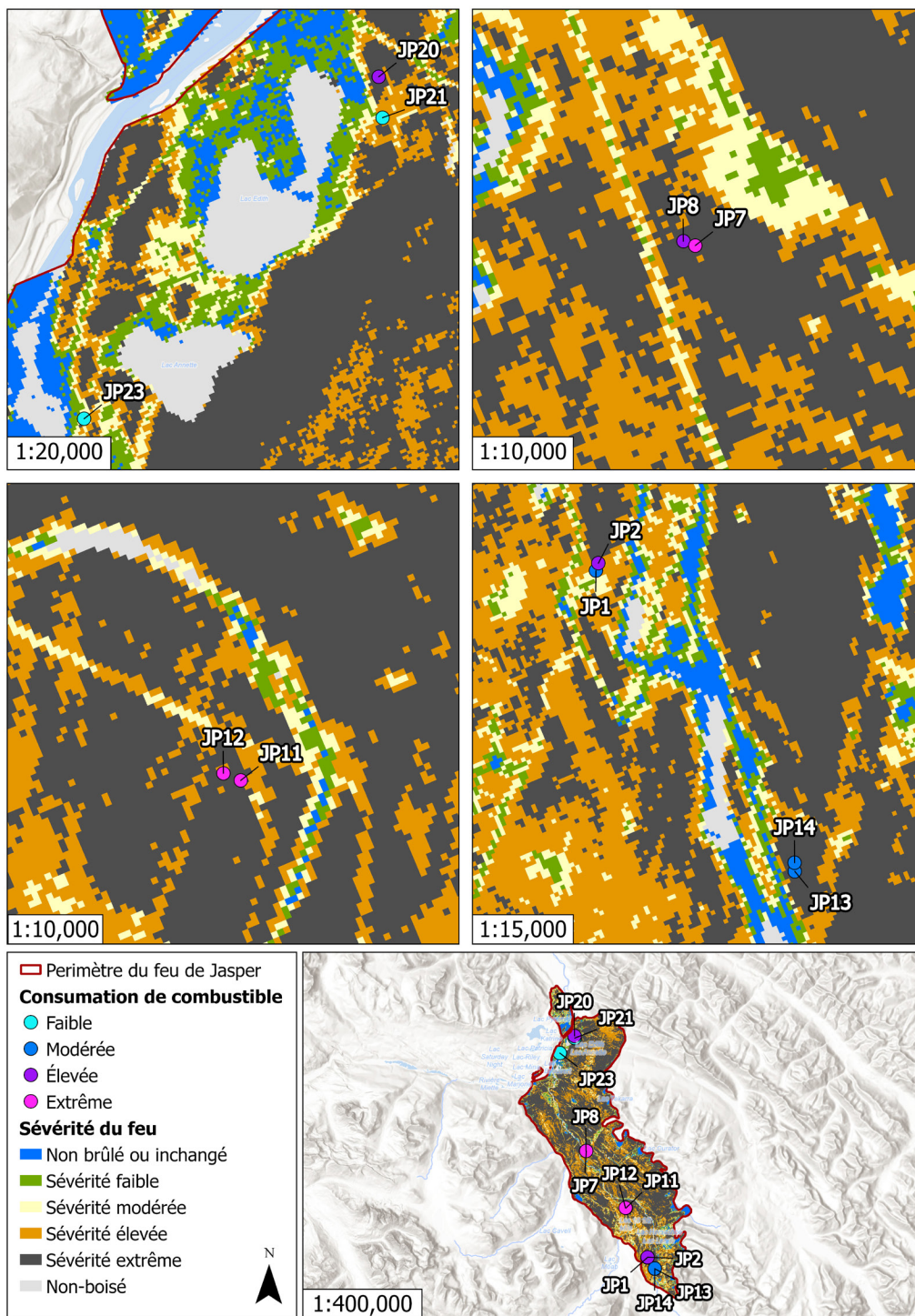




Figure 30. Exemples de peuplements traités avec des combustibles brûlés illustrant un gradient de sévérité du feu et de mortalité des arbres. **A**, Sévérité modérée avec un léger brûlage de cime et une faible mortalité au Jasper Park Lodge. **B–D**, Haute sévérité avec presque une consommation complète de cime et mortalité importante au sud de la cour de l’auberge et chantier de bois (**B**), le camping Whapiti (**C**); et le camping Whistlers (**D**).

5.3 Intensité de l'incendie du front

L'intensité du front est une caractéristique du comportement d'incendie qui exprime le taux de dégagement de chaleur de la partie la plus active d'un incendie de végétation (**Encadré 4**) [90]. Dans le système canadien de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, cette mesure est appelée intensité du feu de front⁹ et est exprimée en kW par mètre de ligne d'arrêt (kW/m). L'intensité de l'incendie de front est corrélée avec les mesures opérationnelles de l'efficacité de la suppression des incendies [91], [92] et est une variable de prévision clé pour la gestion des incendies de végétation.

Bien que l'intensité d'incendie et l'intensité du front représentent des variables physiques continues sans limite supérieure ni inférieure, le personnel de lutte contre les feux décrit généralement l'intensité de l'incendie en utilisant les classes d'intensité du front, comme suit (les valeurs représentent kW/m) : Classe 1, <10 kW/m; Classe 2, 10– 500 kW/m; Classe 3, 500 –2,000 kW/m; Classe 4, 2 000– 4 000 kW/m; Classe 5, 4 000 – 10,000 kW/m; Classe 6, >10 000 kW/m (**Figure 31**) [63].

Le **Tableau 7** montre les valeurs de l'intensité du front estimée pour les épisodes de propagation les plus intenses du 24 juillet (Section 4.6), estimées en utilisant les valeurs mesurées de la vitesse de propagation, la valeur moyenne des CTC des parcelles sur le terrain (Section 5.2) et en utilisant les hypothèses PCI (**Encadré 4**). Où la plus haute estimation de la vitesse de propagation ROS (91,9 m/min) chevauchait les valeurs de consommation de combustible les plus élevées (par exemple, 14 kg/m²; **Tableau 6** et **Figure 28**), l'intensité du front pourrait atteindre jusqu'à 386 000 kW/m. Comme indiqué dans l'**Encadré 4**, ces valeurs extrêmement élevées ne sont pas nécessairement indicatives de longueurs extrêmes de flammes mais reflètent plutôt de longues périodes de résidence et une forte consommation de combustible causées par le fort panache d'incendie de rotation.

Encadré 4. Calculer l'intensité d'incendie

L'intensité d'incendie est une mesure importante utilisée pour comparer le comportement d'incendie au sein de types de combustibles similaires. Elle est destinée à refléter le taux de libération d'énergie provenant de la combustion du flambage, calculé comme le produit du contenu thermique de la biomasse en combustion, du taux de propagation (ROS) d'une ligne d'arrêt, et de la consommation totale de combustible (CTC) [80]. Selon la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, cela est simplifié comme suit : intensité du front = $300 \times \text{ROS} \times \text{CTC}$ pour des valeurs d'intensité du front en kW/m, ROS en m/min, et CCT en kg/m² [5]. À des fins pratiques, l'intensité d'incendie est souvent liée à la longueur de flamme, une quantité facilement observée par le personnel de la suppression des incendies. Cependant, les flammes d'incendie de végétation sont des phénomènes transitoires et les estimations visuelles de la longueur des flammes peuvent être imprécises. Mesurer la CTC pendant la combustion active enflammée sur le terrain est un défi. Ainsi, il est souvent déterminé comme la différence entre les mesures de la charge combustible avant la combustion et après la combustion, jours ou semaines plus tard, comme dans cette étude. Cependant, parce que les mesures post-incendie incluent également le combustible consommé pendant la combustion lente – brûlage sans flamme – leur utilisation surestime l'intensité de la ligne d'arrêt. Un facteur clé affectant l'intensité du front est le temps de résidence des flammes, qui correspond à la durée pendant laquelle des flammes actives sont présentes dans une couche de combustible. Pour les incendies de cime provoqués par le vent dans les forêts boréales, le temps de résidence varie généralement de 30 à 60 secondes. Cependant, lors d'incendies extrêmes – tels que des panaches d'incendies rotatifs ou des incendies de grande surface – le temps de résidence peut s'étendre sur plusieurs minutes, entraînant des valeurs de CTC beaucoup plus élevées. Les valeurs de l'intensité du front élevées dans de tels cas ne sont pas dues à une libération de chaleur plus rapide ou à des flammes plus longues, mais plutôt à une combustion flambante prolongée due à une ventilation efficace et à un combustible abondant.

⁹ Des documents et études canadiens antérieurs utilisaient le terme *intensité de feu frontal*, mais depuis la publication de la description technique de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, l'intensité du front est devenue la norme.

Tableau 7. Intensité du front estimée du complexe d'incendies de Jasper pendant l'après-midi du 24 juillet

Temps (HAR)	Distance (m)	Vitesse de propagation (m/min)	Vitesse de propagation (km/h)	Intensité du front (kW/m)	Est. Longueur de flamme (m) ^b
14 h 3 – 14 h 30 ^c	1 520	56,3	3,4	145 244	48,4
14 h 30 – 14 h 57 ^c	2 480	91,9	5,5	236 978	67,0
14 h 3 – 14 h 57 ^c	4 000	74,1	4,4	191 111	58,1
14 h 57 – 16 h 55 ^d	4 790	40,6	2,4	104 731	38,9

^a Basé sur une combustion du combustible totale moyenne de 8,6 kg/m² à partir de mesures sur le terrain (Section 5.2.3).

^b L'estimation de la longueur de flamme est une estimation générale de la taille de flamme basée sur l'intensité du front [83], [93].

^c La position de la ligne d'arrêt à 14 h 30 a été cartographiée à partir des points chauds détectés par satellite (Annexe A2, Annexe B6) et peut être moins précise que d'autres positions d'incendie cartographiées. L'observation combinée de la vitesse de propagation de 14 h 3 à 14 h 57 englobe les deux distances de propagation plus courtes, avec une ligne cartographiée uniquement à partir de photogrammétrie, et est donc probablement plus précise.

^d Comprend des parties de la ligne d'arrêt affectées par des opérations d'allumage commençant à 16 h 40 (section 4.6.2).

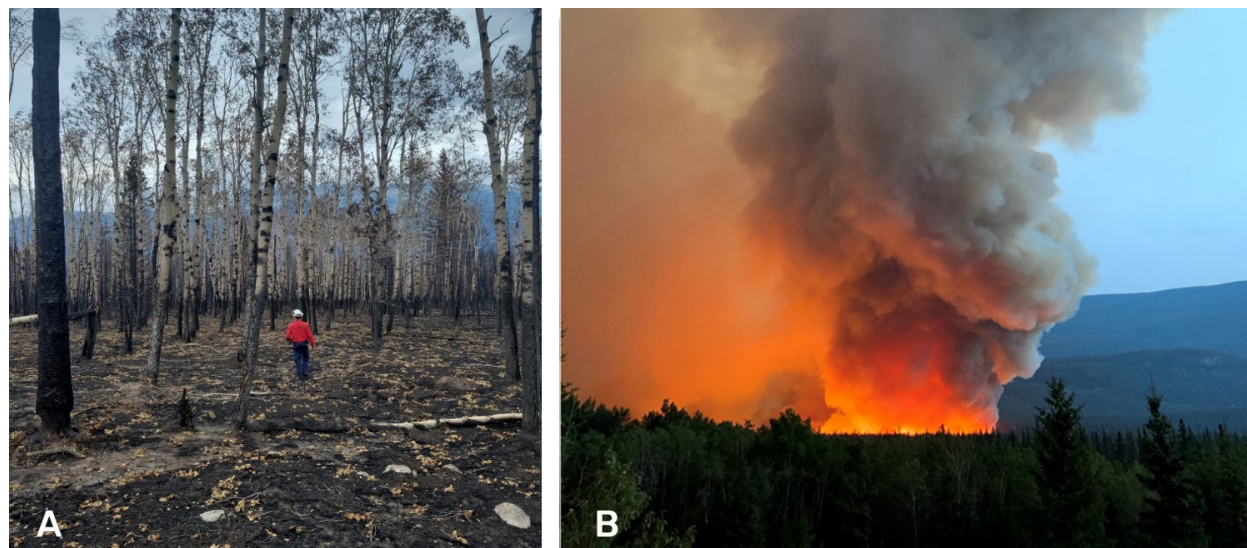


Figure 31. Autres exemples de comportement d'incendie. **A**, Exemple des conséquences d'un comportement d'incendie de surface de haute intensité dans un peuplement de peupliers faux-trembles continu près du ruisseau Whistlers. La vitesse de propagation de l'incendie réelle est inconnue, mais les hauteurs de carbonisation à plus de 3 m sur les troncs de peuplier faux-tremble suggèrent un incendie d'au moins classe 4 ou plus, dépassant les valeurs d'intensité d'incendie typiques pour la forêt de peuplier faux-trembles. **B**, Comportement d'incendie de classe d'intensité 5 observé à 22 h 10 au niveau de l'incendie au Nord le 23 juillet, montrant des conditions de combustion intenses et une période de combustion prolongée. Notez la colonne de fumée verticale typique de l'activité du feu sous des conditions de vent inférieures.

5.4 Comparaison de la vitesse de propagation

Trois observations de propagation du feu de l'Intervalle 5.1 (Tableau 7) sont présentées dans la **Figure 32** et comparées avec les modèles de vitesses de propagation (VP) existants au format PCI (Section 2). La vitesse de propagation est présentée comme une fonction de l'IPI (Section 3.1), qui mélange les effets observés expérimentalement de l'humidité du combustible et de la vitesse du vent [5], [56]. L'IPI est généralement calculé en utilisant les meilleures ICL et les vitesses du vent disponibles. La moyenne ICL utilisée dans ce cas (93,8) était la valeur quotidienne moyenne entre 2 stations de fond de vallée, la station Ranger Creek (94,7) et la station Jasper Warden (92,8, lorsque les

précipitations sont exclues), puisque l'origine de l'incendie était située entre elles. Les vitesses horaires du vent provenaient de la station Ranger Creek, similaires aux valeurs de vitesse du vent de surface prédites par le modèle SHRPD.

Il est évident que les observations de la vitesse de propagation du 24 juillet sont bien au-dessus des prévisions du système PCI utilisant les types de combustible C-2 (épinette boréale) et C-3 (pin mature ou pin lodgepole) généralement utilisés pour prédire le comportement d'incendie dans cette région. Les modèles de vitesse de propagation représentant la phase d'attaque rouge des pins affectés par le DPP [94], et un modèle non publié de la phase d'attaque grise des pins tordus affectés par le DPP basé sur des observations d'incendies de

végétation en Colombie-Britannique ont également sous-estimé les vitesses de propagation. Au lieu de cela, les observations de Jasper étaient plus proches des prédictions du modèle PCI utilisant 2 complexes de combustible représentant des vitesses de propagation d'incendie plus élevées : le modèle M-3 représentant un peuplement mixte dominé par le sapin baumier, défolié par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (montré pour la condition de 100 % de sapin mort : M-3/100 %CD), et les forêts de pins boréaux mesurées lors de l'Expérience internationale de modélisation des feux de cimes (EIMFC). Le complexe de combustibles de l'EIMFC des Territoires du Nord-Ouest était reconnu pour sa haute continuité verticale de combustible et la facilité de développement d'incendie de cime [95], [96]. Basé sur les caractéristiques de combustibles décrites (Section 2), au moins certains peuplements contenaient des caractéristiques à la fois des complexes de combustibles M-3/100 % CD et EIMFC : un surétage de conifères principalement mort, tué par des insectes, ainsi qu'une structure verticalement continue, avec des combustibles de transition abondants sous forme de jeunes épinettes ou de sapin subalpin [41]. Il a été suggéré, au milieu de diverses opinions concernant les répercussions du DPP sur l'activité d'incendie (Section 2.2), que les peuplements avant un incendie avec des proportions intermédiaires de pins morts (ensemble avec des conifères vivants) entraînent les niveaux de sévérité d'incendie les plus élevés, et possiblement le comportement d'incendie le plus volatile par rapport aux proportions de pins morts faibles ou extrêmement élevées [87]. Le raisonnement est que les combustibles vivants de la cime (strates supérieures, intermédiaires ou de liaison) maintiennent la continuité et la connectivité horizontales et verticales des combustibles, tandis que les pins morts apportent une intensité supplémentaire significative grâce aux combustibles ligneux grossiers disponibles (secs).

Il est important de noter que les observations indiquées dans la **Figure 32** reflètent les valeurs de vitesse du vent libre observées enregistrées par la station du ruisseau Ranger (3–10 km/h de 14 h à 17 h le 24 juillet), et sont très faibles compte tenu de l'activité d'incendie extrême qui a été décrite. Des vitesses de vent plus élevées ont été modélisées (**Figure 9**) et observées à des altitudes élevées. Par exemple, les vitesses de vent soutenues dans l'après-midi du 24 juillet variaient entre 16 km/h et 31 km/h au niveau de 2200 m, représenté par la station Paradise, avec des rafales dépassant 75 km/h (**Figure 8**). Une activité incendiaire extrême en

présence de vents légers au niveau du sol résulte souvent d'une forte flottabilité et de courants ascendants dans une colonne de convection bien développée. [64]. Alors que l'air monte dans la colonne de convection, des vents turbulents, induits par l'incendie, près du sol, amènent de l'air frais riche en oxygène vers le bas et vers l'intérieur pour remplacer l'air chaud qui monte. Les panaches convectifs intenses peuvent également interagir avec des vents plus forts et plus secs en altitude, qui peuvent se mélanger vers le sol, augmentant ainsi l'activité de l'incendie. Ce type de conditions météorologiques propices aux feux n'est pas bien représenté par les modèles de comportement d'incendie opérationnels, qui tendent à supposer un comportement d'incendie simple entraîné par le vent de surface tel que détecté par des relevés de vent au niveau du sol (10 m) [5], [97]. Ainsi, une autre raison de la sous-prédiction des modèles opérationnels (Figure 32) est simplement qu'ils ne sont pas destinés à représenter la propagation d'incendie causée par le panache. Les observations extrêmes de la vitesse de propagation peuvent également refléter une propagation rapide via des repérages à moyenne portée (par exemple, environ. 200 m–2 km [74]), où des tisons déclenchent de nouveaux départs d'incendie bien avant la ligne d'arrêt existante et les incendies déconnectés sont ensuite réunis.

Les modèles physiques tentent de capturer ces interactions plus complexes; cependant, les limites des ressources informatiques et le besoin de combustibles tridimensionnels détaillés et d'informations atmosphériques empêchent leur utilité pour les prévisions en temps quasi réel du comportement d'incendie. Au lieu de cela, ils ont été utilisés pour reconstruire des scénarios de gestion alternatifs afin de révéler des facteurs d'environnement d'incendie qui ont pu contribuer au comportement observé [98], [99], [100], [101]. Des efforts sont en cours pour réaliser une reconstruction détaillée de l'incendie au sud de Jasper en utilisant des modèles des conditions atmosphériques propices aux feux en 3 dimensions [102], [103].

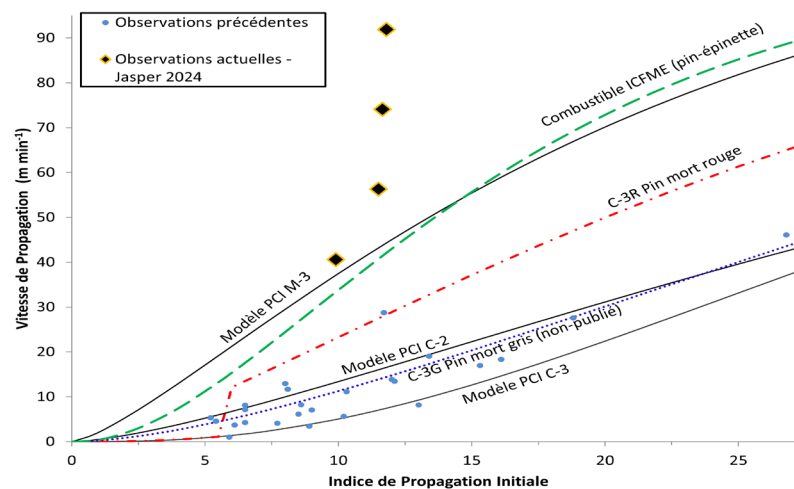


Figure 32. La vitesse de propagation observé (ROS) le 24 juillet (Observations de Jasper 2024) comparés au Système PCI standard [11] et aux autres modèles de vitesse de propagation, excluant l'effet de l'ICD. C-2 indique le type de combustible du système PCI de l'épinette boréale; C-3, le type de combustible du système PCI du pin gris ou du pin tordu latifolié; C-3G, la phase d'attaque grise du pin tordu latifolié affecté par le DPP provenant d'incendies de végétation précédents et de feux expérimentaux (modèle ajusté; DDB Perrakis, données non publiées); C-3R, la phase d'attaque rouge du pin tordu latifolié affecté par le DPP [94]; PCI, Prévision du comportement d'incendie; EIMFC, peuplements denses de pins et d'épinette des Plaines Boréales [96]; M-3, type de combustible du système PCI des forêts mixtes de sapin baumier mort – sans feuilles, condition de 100 % de sapin mort. Les observations de Jasper 2024 sont les mêmes que dans le **Tableau 7**, avec des valeurs IPI calculées en utilisant des vitesses de vent horaires de la station Ranger Creek et l'ICL quotidien comme la moyenne des stations Ranger Creek et Jasper Warden (93,8). Le point à IPI 11.7/ROS 74.1 représente la vitesse de propagation combinée de 14 h 30 à 14 h 57.

6. Résumé et conclusions

6.1 Facteurs clés contribuant à l'activité d'incendie observée

1. Sécheresse :

Les conditions sèches prolongées avant l'allumage ont considérablement augmenté la quantité de combustible disponible pour la combustion. Les données du système IFM provenant des stations voisines à la fin de la vague de chaleur de juillet ont montré des valeurs de l'ICL aussi élevées que 96 et des valeurs de l'ICD dépassant 160, représentant certaines des valeurs de l'ICD les plus élevées jamais enregistrées dans la vallée de la haute Athabasca. Ce degré de sécheresse a rendu presque tous les combustibles de surface disponibles pour la combustion, y compris la litière, les couches de l'humus et les débris ligneux, même dans des peuplements de conifères en bonne santé.

2. Connectivité des combustibles :

La présence d'une végétation combustible continue constitue une condition préalable à la propagation d'un incendie, puisque l'avancée du feu suit les combustibles disponibles. La zone de départ de l'incendie, soit la vallée de la rivière de la haute Athabasca, était occupée par une forêt résineuse mature continue s'étendant sur environ 25 km. Cela a fourni un couloir presque ininterrompu pour la propagation d'incendie (à l'exception de la rivière et des autoroutes) qui était également orientée de manière à canaliser l'écoulement du vent le long de la vallée. La continuité étendue des combustibles a permis une propagation incontrôlée du complexe d'incendies pendant la fenêtre de 50 heures de conditions météorologiques favorables suivant l'allumage (22 au 24 juillet 2024).

3. Impact du dendroctone du pin ponderosa :

De vastes superficies de peuplements âgés d'environ 7 ans, modérément à sévèrement touchés et morts, en phase d'attaque grise à la suite de l'épidémie de dendroctone du pin ponderosa qui a atteint un sommet en 2017, offraient peu de couvert forestier. Cela a accéléré le séchage des combustibles en raison d'une exposition solaire accrue et d'une plus grande pénétration du vent, ce qui a augmenté la disponibilité des combustibles de surface. La mortalité des arbres causée par le DPP a également transformé les arbres vivants et humides en combustibles ligneux secs, debout ou abattus. La consommation de combustible (7–14 kg/m²) et les intensités d'incendie associées (100 000–300

000 kW/m le 24 juillet) étaient 2 à 3 fois plus élevées que dans les forêts vertes non affectées. L'abondance de combustibles secs a probablement conduit à des périodes de brûlages quotidiennes plus longues, tandis que l'intensité des feux extrêmes a probablement contribué à une forte activité convective et au développement du panache pendant certaines périodes de brûlage. Les parcelles d'échantillonnage établies avant l'incendie par des chercheurs universitaires ont permis des mesures précises de la consommation de combustibles.

4. Allumage initial et accélération rapide :

Une cellule orageuse convective se déplaçant vers le nord depuis la Colombie-Britannique a traversé la vallée de la haute Athabasca le soir du 22 juillet, déclenchant au moins trois incendies provoqués par la foudre près des chutes d'Athabasca à 19 h 5. Dans les 10 minutes, un comportement d'incendie intense a été observé en raison de vents soutenus de 21 km/h et de rafales extrêmes enregistrées à la station météorologique la plus proche. À 23 h, l'incendie avait dépassé 3 500 ha, largement au-delà des ressources disponibles pour l'attaque initiale ou la contention rapide.

5. Intensité et propagation soutenues de l'incendie :

L'incendie a progressé depuis les lieux d'allumage sur 23 km vers le nord jusqu'au lotissement urbain de Jasper en environ 48 heures, puis vers le nord-est sur 8 km supplémentaires avant l'arrivée de pluies généralisées. Il y avait un développement rapide des incendies lorsque l'humidité relative était inférieur à 30 % durant la nuit du 22 juillet, tard le matin et au début de l'après-midi du 23 juillet, et l'après-midi et le soir du 24 juillet. La vitesse de propagation d'incendie était plus basse dans les premières heures du matin du 23 juillet et surtout la nuit et le matin du 24 juillet en raison d'une humidité relative plus élevée, exacerbée par des inversions atmosphériques prolongées dans le fond de la vallée. Cependant, l'activité intense des incendies a été observée ou calculée pour plusieurs périodes de la nuit et du matin. Cela s'écartait considérablement du schéma classique d'intensité maximale d'incendie en fin d'après-midi, avec une activité minimale durant la nuit en raison des variations diurnes typiques de la température et de l'humidité relative. L'augmentation du brûlage au cours de la nuit a été liée à des graves sécheresses et à des changements climatiques [104] et a peut-être été facilitée par d'abondantes combustibles touchés par le DPP.

6. Comportement des incendies entraînés par le panache et vents générés par l'incendie :

Les images aériennes indiquent un comportement d'incendie entraîné par des panaches, avec une flamme profonde aspirée et une formation de nuages pyrocumulus, en particulier dans l'après-midi du 24 juillet. Les conditions de sécheresse, la combustion élevée de combustibles, des vents modérés et la propagation rapide d'incendie sur des pentes abruptes ont contribué à la formation d'un panache intense [10]. Les vents induits par l'incendie ont probablement dépassé 200 km/h près de la colonne de fumée principale le 24 juillet, renversant des arbres sur une vaste zone. L'amplification de l'intensité d'incendie a conduit à des hauteurs de flammes dépassant 50 m pendant les périodes de convection intense. Les vents de fond ambiants de la vallée à l'extérieur de la zone active d'incendie sont restés légers à modérés. Les vitesses de propagation d'incendie étaient beaucoup plus élevées que prévu avec les systèmes opérationnels actuels pendant cet intervalle de temps.

7. Effondrement de colonne, transport de tisons et courants descendants vers Jasper :

La production et le transport de tisons sont une cause majeure de dommages aux structures dans les catastrophes liées aux incendies en milieu périurbain. Une forte convection et le développement de panaches ont été maintenus alors que le front nord-ouest de l'incendie se propageait rapidement sur les Whistlers en fin d'après-midi du 24 juillet. Cependant, la colonne de convection s'est effondrée vers 17 h 40 à 17 h 45, probablement en raison d'interactions complexes entre (1) les vents de vallée convergents (du sud depuis la vallée de l'Athabasca et de l'ouest depuis le col Yellowhead), (2) l'attraction de l'incendie en montée sur des pentes raides, et (3) la fin des combustibles continus au-dessus de la limite des arbres.

L'effondrement de la colonne a produit une épaisse fumée continue au niveau du sol et de forts mais brefs vents sud-ouest sur le site du lotissement urbain de Jasper entre 17 h 45 et 18 h 5. La visibilité a chuté soudainement et des vents forts ont cassés des branches des grands arbres feuillus, suggérant des rafales localisées jusqu'à 110 km/h. Cet événement a probablement causé le transport à longue distance (>1 km) de tisons vers le lotissement urbain de Jasper et les des allumages initiaux de structure. Cependant, la dynamique de l'effondrement des colonnes reste mal quantifiée.

8. Traitements des combustibles :

Les traitements des combustibles mis en œuvre autour du lotissement urbain de Jasper depuis 2003 ont modéré

le comportement d'incendie. Dans les zones traitées, la sévérité d'incendie, la combustion du combustible et le comportement d'incendie de cime étaient inférieurs par rapport aux zones non traitées, réduisant l'étendue d'incendie de cime soutenu et par conséquent réduisant la vitesse de propagation. Au lieu de cela, un incendie de surface intense avec des flambées a dominé dans les zones traitées. Ces traitements ont également probablement limité la production et le transport de tisons. Certaines preuves suggèrent que les traitements récents (< 10 ans) ont été plus efficaces que les traitements plus anciens pour atténuer le comportement extrême d'incendie.

9. Vitesse et profil du vent incertains :

La vitesse du vent est le facteur le plus influent affectant la vitesse de propagation des incendies de végétation, l'amorçage des incendies de cime et le transport des tisons [74], [105], [106] et de nombreuses catastrophes précédentes d'incendies de végétation péri-urbain ont été associées à des vitesses de vent soutenues fortes (>30 km/h). Les données de vent de surface pour le lotissement urbain de Jasper et la vallée de la haute Athabasca ont été compilées à partir de jusqu'à 8 stations météorologiques et du modèle numérique de prévision météorologique SHRPD à haute résolution. Bien que des vents soutenus dépassant 30 km/h aient été enregistrés par intermittence dans des stations en altitude (>2 200 m à Paradise et >3 000 m à Tangle), les stations situées au fond de la vallée (par exemple Ranger Creek, Jasper Warden, Dorothy) et les sorties de modèles météorologiques haute résolution (provenant du modèle SHRPD) ont toutes suggéré des vitesses plus faibles, sauf pour les rafales autour du moment de l'allumage. Les observations du personnel de la lutte contre les incendies sur le terrain ou à bord d'aéronefs ont suggéré des épisodes localisés de vents plus forts, mais ceux-ci sont difficiles à concilier avec les mesures automatisées des instruments des stations météorologiques. Des valeurs élevées de vitesse de propagation du feu malgré de faibles vitesses de vent de surface suggèrent des influences atmosphériques non mesurées et des interactions complexes entre l'atmosphère et le relief qui ont pu jouer un rôle important.

6.2 Interprétations et répercussions pour gestionnaires

Études de cas sur les incendies de végétation

Ce rapport présente une analyse complète de l'allumage et de la propagation de l'incendie South Fire de Jasper. En examinant les conditions des combustibles, les conditions météorologiques propices aux incendies de

forêt et la propagation d'incendie, ainsi que les évaluations post-incendie des impacts et de la sévérité, une chronologie détaillée et fondée sur des données probantes du comportement d'incendie a été établie, tenant compte de la progression de l'incendie depuis son allumage jusqu'à son impact sur les éléments de valeur à Jasper au cours d'une période critique de 50 heures. Chaque catastrophe de forêt a certaines caractéristiques uniques : les études de cas servent à mettre en évidence ces éléments et à révéler des défis complexes nécessitant un examen plus approfondi. Il convient de noter que les incendies de végétation médiatisés et à fort impact, qui attirent l'attention du public, offrent des occasions de sensibiliser et de mieux comprendre la dynamique des incendies.

Augmentation du risque

La probabilité qu'un incendie de végétation de grande ampleur affecte une collectivité est déterminée par la probabilité qu'un incendie s'allume et échappe à l'attaque initiale dans des conditions météorologiques favorables à une propagation rapide, ainsi que par les caractéristiques des combustibles dans le bassin pyrographique, c'est-à-dire la zone paysagère à partir de laquelle un incendie peut se propager jusqu'à la collectivité. Les combustibles à l'intérieur du périmètre de l'incendie South Fire de Jasper consistaient principalement en des peuplements de forêts de conifères matures interconnectés s'étendant sur 25 km depuis la vallée de la haute Athabasca jusqu'au lotissement urbain de Jasper. Avant 1900, la vallée présentait un mélange plus hétérogène de végétation ouverte et de forêts fermées, en particulier dans le fond de la vallée et les pentes inférieures. Cependant, plus d'un siècle d'exclusion de feu a conduit à une structure forestière plus dense et plus uniforme. Une forte continuité des combustibles de cime a créé des conditions favorables à la propagation soutenue des incendies de cime et aux grands incendies de forêt, ainsi qu'à des peuplements plus vulnérables au DPP (Section 2). Cette situation n'est pas unique – la couverture forestière mature a augmenté dans toute la Cordillère canadienne, et les grands incendies précédents dans les forêts montagnardes et subalpines, y compris le parc national Jasper (Annexe B8), illustrent le potentiel croissant d'incendies de végétation importants

Une propagation rapide peut dépasser la capacité d'intervention et provoquer une situation catastrophique

Les allumages d'incendie par la foudre survenus le 22 juillet se sont produits après une période de dessèchement sévère, conformément à des études récentes qui identifient l'aridité des combustibles

comme un facteur majeur contribuant à l'augmentation de la superficie brûlée et de la sévérité des incendies dans l'Ouest canadien. [2], [107], [108]. L'incendie South Fire a rapidement pris de l'ampleur dès son allumage et a atteint la cime des arbres sous l'influence des vents générés par l'orage. Les tactiques de suppression directe sont devenues inefficaces en quelques minutes seulement après l'allumage et sont restées inapplicables jusqu'à ce que l'incendie atteigne Jasper, en raison de son intensité soutenue et de sa propagation rapide. Bien que la plupart de l'intervention complète aux incendies de végétation au Canada soient maîtrisés avec succès dans les premières 24 heures suivant la détection [109], la maîtrise dépend d'une détection précoce et d'un déploiement rapide des ressources avant que la longueur du périmètre ou l'intensité d'incendie ne dépassent les capacités des équipes terrestres et du soutien aérien [110], [111], [112]. Une maîtrise réussie nécessite généralement une modération de la vitesse du vent ou une augmentation de l'humidité des combustibles (réduisant ainsi l'intensité et la propagation d'incendie), ainsi qu'un taux de construction de ligne d'arrêt supérieur à l'accroissement du périmètre de l'incendie; les barrières naturelles ou les pare-feux sont également souvent importants. Le complexe d'incendies de Jasper a présenté une chronologie de croissance extrêmement rapide et soutenue par rapport à d'autres incendies de forêt cordilléraires récents (Annexe B8). Cela illustre comment un faible pourcentage d'allumages survenant dans des conditions extrêmes demeure incontrôlable tant que ces conditions persistent. La reconnaissance précoce du potentiel d'incendie extrême par Parcs Canada et les résidents du lotissement urbain de Jasper a été cruciale pour l'évacuation sûre et efficace des résidents et des visiteurs.

De nombreuses catastrophes d'incendies de végétation passées peuvent être attribuées à l'évolution rapide des événements : un incendie de végétation se propage rapidement et atteint une collectivité en quelques heures ou jours, dépassant le déploiement des mesures de protection et des ressources de lutte contre les incendies. [113]. Le tempo de catastrophes est souvent lié à des vents violents à extrêmes (par exemple [67]). Cependant, pendant les 50 heures de propagation active de l'incendie au sud de Jasper, les vents de surface sont restés modérés, mettant en évidence des lacunes de connaissances en météorologie de montagne et sur l'influence des profils atmosphériques sur le comportement du feu.

Intensité extrême d'incendie et développement du panache

La grave infestation de DPP a accru l'inflammabilité des combustibles forestiers en forêt montagnarde et

subalpine. Combinés à des conditions de sécheresse significatives, des combustibles secs abondants ont prolongé les périodes de brûlage, notamment les 13 heures d'incendie de cime soutenu (10 h à 23 h) le 23 juillet. Une forte consommation de combustibles et un profil favorable du vent ont produit une forte énergie convective, entraînant une propagation d'incendie causé par le panache.

L'événement de rafale descendante ayant touché Jasper dans l'après-midi du 24 juillet s'est produit dans des conditions météorologiques complexes, impliquant des vents convergents dans la vallée et l'effondrement d'une colonne de convection puissante. Déterminer l'impact relatif de l'événement d'embrasement de l'effondrement de colonne, des caractéristiques du vent, et d'incendie de cime subalpin plus éloigné par rapport aux incendies de surface intenses près du lotissement urbain reste un défi et dépasse la capacité des modèles de prédiction actuels.

Résilience de la collectivité

La gestion des combustibles autour des collectivités est conçue pour atténuer les impacts directs des incendies et limiter le transport des tisons sur de courtes à moyennes distances. Le parc national Jasper avait mis en œuvre des efforts de mitigation des combustibles plus étendus autour de son lotissement urbain que toute autre collectivité canadienne touchée par une catastrophe d'incendie de végétation. Les traitements des combustibles, ainsi que les pare-feux naturels et artificiels (rivières, lacs, autoroutes, voies ferrées, terrains de golf, îlots de forêts décidus), ont probablement réduit l'intensité des incendies et l'impact des tisons dans l'interface péri-communautaire. Ils ont ainsi contribué à atténuer la menace pour la sécurité et à améliorer les positions défendables pour les pompiers de bâtiments, diminuant probablement les pertes de structures dans la zone du lotissement et ses environs.

Toutefois, les désastres liés aux incendies de végétation résultent d'une succession d'événements : (1) potentiel d'incendie de végétation sévère; (2) conditions de combustion extrêmes; (3) allumages multiples ou structures inflammables; et (4) ressources de suppression dépassées [114]. Un consensus émergent suggère que l'amélioration de la résilience communautaire face aux incendies de végétation nécessite une approche intégrée et multiforme [115], [116]. Cela implique des stratégies comprenant l'évaluation des risques paysagers; la gestion des combustibles dans les paysages et les milieux périurbains pour réduire la sévérité des incendies; la conception, la construction et l'entretien de structures résistantes aux incendies; ainsi que la planification communautaire et la préparation à la présuppression pour maximiser l'évacuation et la réponse d'urgence, adaptées au contexte socioécologique de chaque collectivité [117]. Les premières conclusions du présent rapport, en particulier concernant le transport de tisons depuis des sources éloignées, ainsi que les efforts d'évacuation et de protection de la structure, soutiennent cette approche.

Les récents incendies de végétation impactant les collectivités partagent des caractéristiques communes – particulièrement les conditions de sécheresse précédentes et les comportements d'incendies extrêmes qui dépassent souvent l'expérience locale et la perception des risques, mettant au défi les stratégies de gestion d'incendies. En documentant et en analysant en profondeur les environnements des incendies et le comportement des incendies lors d'événements très médiatisés, nous pouvons améliorer notre compréhension de la propagation des incendies de végétation dans des conditions extrêmes et de ses effets sur les collectivités. Apprendre de ces événements est essentiel pour s'adapter au paysage changeant des incendies au Canada.

Références

- [1] MNP LLP, "A Review of the 2016 Horse River Wildfire : Alberta Agriculture and Forestry Preparedness and Response, Edmonton, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://open.alberta.ca/publications/a-review-of-the-2016-horse-river-wildfire-alberta-agriculture-and-forestry-preparedness-and-response>
- [2] P. Jain *et al.*, «Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season in Canada», *Nat. Commun.* vol. 15, no 1, p. 6764, Aug. 2024, doi : 10.1038/s41467-024-51154-7.
- [3] B. J. Stocks *et al.*, "The Canadian Forest Fire Danger Rating System : An Overview», *For. Chron.*, vol. 65, no. 6, pp. 450 – 457, Déc.. 1989, doi : 10.5558/tfc65450-6.
- [4] S. W. Taylor et M. E. Alexander, « Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 15, no 1, p. 121–135, Mar. 2006, doi : 10.1071/WF05021.
- [5] Groupe d'évaluation du danger d'incendie de Foresterie Canada, *Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt*, vol. ST-X-3. Ottawa, Canada : Forestry Canada, 1992. Consulté : 28 oct. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/59e76483-5ed0-445b-9bb2-52661dd98867>
- [6] K. G. Hirsch, *Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: user's guide*, vol. 7. Edmonton : Service canadien des forêts, 1996. Consulté : Le 23 juin 2020. [En ligne]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/handle/1845/234077>
- [7] m. A. Finney, S. S. McAllister, J. M. Forthofer, et T. P. Grumstrup, *Wildland Fire Behaviour : Dynamics, Principles and Processes*. Csiro Publishing, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://ebooks.publish.csiro.au/content/wildland-fire-behaviour>
- [8] M. G. Cruz, M. E. Alexander et P. M. Fernandes, « Evidence for lack of a fuel effect on forest and shrubland fire rates of spread under elevated fire danger conditions: implications for modelling and management », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 31, no 5, p. 471–479, Apr. 2022, doi : 10.1071/WF21171.
- [9] K. C. Ryan, « Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, » *Silva Fenn.*, vol. 36, no. 1, Déc.. 2002, Consulté : Février 2025. [En ligne]. Disponible : <https://www.silvannica.fi/article/548>
- [10] P. A. Werth *et al.*, «Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: volume 2 for fire behavior specialists, researchers, and meteorologists», *Gen Tech Rep PNW-GTR-891 Portland US Dep. Agric. For. Serv. Pac. Northwest Res. Stn. 258 P*, vol. 891, 2016, doi : 10.2737/PNW-GTR-891.
- [11] T. Banerjee, W. Heilman, S. Goodrick, J. K. Hiers, et R. Linn, « Effects of canopy midstory management and fuel moisture on wildfire behavior, » *Sci. REP.*, vol. 10, no 1, p. 17312, Oct. 2020, doi : 10.1038/s41598-020-74338-9.
- [12] J. L. Coen, M. Cameron, J. Michalak, E. G. Patton, P. J. Riggan, et K. M. Yedinak, « WRF-Fire: Coupled Weather–Wildland Fire Modeling with the Weather Research and Forecasting Model, » *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 52, pp. 16–38, Jan. 2013, doi : 10.1175/JAMC-D-12-023.1.
- [13] A. Bakhshaii et E. A. Johnson, « A review of a new generation of wildfire–atmosphere modeling, » *Can. J. For. RES.*, vol. 49, no. 6, pp. 565– 574, Jun. 2019, doi : 10.1139/cjfr-2018-0138.
- [14] M. E. Alexander et M. G. Cruz, « Are the applications of wildland fire behaviour models getting ahead of their evaluation again? », *Environ. Model. Softw.*, vol. 41, p. 65–71, Mar. 2013, doi : 10.1016/J.envsoft.2012.11.001.
- [15] S. W. Taylor, D. G. Woolford, C. B. Dean, et D. L. Martell, « Wildfire Prediction to Inform Fire Management: Statistical Science Challenges, » *Stat. SCI.*, vol. 28, no. 4, p. 586–2015, nov. 2013, doi : 10.1214/13-STS451.
- [16] J. J. Sharples, « An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 18, no. 7, pp. 737–754, oct. 2009, doi : 10.1071/WF08041.
- [17] M. J. Schroeder et Buck, *Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations*. dans l'Agriculture Handbook, no. 360. Washington, D.C. : USDA Forest Service, 1970. Consulté : Jul. 02, 2025. [En ligne]. Disponible : <https://www.frames.gov/catalog/30294>
- [18] J. Milbrandt, S. Bélair, M. Faucher, M. Vallée, M. L. Carrera, et A. Glazer, « The Pan-Canadian High Resolution (2,5 km) Prediction System » vol. 31, no 6, p. 1791–1816, décembre 2016, doi : 10.1175/WAF-D-16-0035.1.
- [19] R. E. Keane, *Wildland Fuel Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing, 2015. doi : 10.1007/978-319-09015-3.
- [20] Groupe de travail sur la stratification écologique, « Cadre écologique national pour le Canada, » Agriculture et Agroalimentaire Canada et Environnement Canada, Ottawa, 1996. [En ligne]. Disponible : <https://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/manuals/1996/index.html>
- [21] C. Van Wagner, M. A. Finney, et M. Heathcott, « Historical Fire Cycles in the Canadian Rocky Mountain Parks, » *For. SCI.*, vol. 52, no 6, p. 704–717, décembre 2006, doi : 10.1093/forestscience/52.6.704.
- [22] R. D. Chavardès, L. D. Daniels, Z. Gedalof, et D. W. Anderson, « Human influences superseded climate to

- disrupt the 20th century fire regime in Jasper National Park, Canada », *Dendrochronologia*, vol. 48, pp. 10–19, avr. 2018, doi : 10.1016/J.dendro.2018.01.002.
- [23] E. L. Davis, C. J. C. Mustaphi, A. Gall, M. F. J. Pisaric, J. C. Vermaire, et K. A. Moser, « Determinants of fire activity during the last 3500 yr at a wildland—urban interface, Alberta, Canada », *Quat. Res.*, vol. 86, no 3, p. 247–259, nov. 2016, doi : 10.1016/J.yqres.2016.08.006.
- [24] R. D. Chavardès et L. D. Daniels, « Altered mixed-severity fire regime has homogenised montane forests of Jasper National Park », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 25, no 4, p. 433–2044, février 2016, doi : 10.1071/WF15048.
- [25] G. F. Tande, « Fire history and vegetation pattern of coniferous forests in Jasper National Park, Alberta », *Can. J. Bot.*, vol. 57, no 18, p. 1912–1931, Sep. 1979, Doi : 10.1139/b79-241.
- [26] C. A. Stockdale, S. E. McDonald, et E. Higgs, « Forest closure and encroachment at the grassland interface: a century-scale analysis using oblique repeat photography », *Ecosphere*, vol. 10, no. 6, p. e 02774, 2019, doi : <https://doi.org/10.1002/ecs2.2774>.
- [27] R. E. Keane, K. C. Ryan, T. T. Veblen, C. D. Allen, J. Logan, et B. Hawkes, « Cascading effects of fire exclusion in the Rocky Mountain ecosystems: a literature review », Fort Collins, CO, General Technical Report RMRS-GTR-91, 2002. Consulté : Février 2025. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-91>
- [28] W. Brookes, L. D. Daniels, K. Copes-Gerbitz, J. N. N., et Carroll, A. L., « A Disrupted Historical Fire Regime in Central British Columbia », *Front. Ecol. Evol.*, vol. 9, 2021, Consulté : Le 04 mai 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fevo.2021.676961>
- [29] J. M. Rhemtulla, R. J. Hall, E. S. Higgs, et S. E. AMC, « Eighty years of change: vegetation in the montane ecoregion of Jasper National Park, Alberta, Canada », *Can. J. For. Res.*, vol. 32, no 11, p. 2010–2021, novembre 2002, doi : 10.1139/x02-112.
- [30] C. White et E. J. Hart, *The Lens of Time: A Repeat Photography of Landscape Change in the Canadian Rockies*. University of Calgary Press, 2007.
- [31] Service canadien des parcs, « Keepers of the Flame », Service canadien des parcs, Direction des ressources naturelles, Ottawa, 1989.
- [32] A. Dhar, L. Parrott, et S. Heckbert, « Consequences of mountain pine beetle outbreak on forest ecosystem services in western Canada », *Can. J. For. Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 987–999, août 2016, doi : 10.1139/cjfr-2016-0137.
- [33] B. J. Cooke et A. L. Carroll, « Predicting the risk of mountain pine beetle spread to eastern pine forests: Considering uncertainty in uncertain times », *For. Ecol. Manag.*, vol. 396, pp. 11–25, juil. 2017, doi : 10.1016/J.foreco.2017.04.008.
- [34] D. C. Romualdi, S. L. Wilkinson, et P. M. A. James, « On the limited consensus of mountain pine beetle impacts on wildfire », *Landsc. Ecol.*, vol. 38, no 9, p. 2159–2178, Sep. 2023, Doi : 10.1007/s 10980-023-01720–z.
- [35] P. Abbott et M. Chapman, « 2017 Freshet and Wildfires Provincial After Action Review », Emergency Management BC, Victoria, BC, 2018. [En ligne]. Disponible : https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/provincial-emergency-planning/embc_after_action_review_report_2017.pdf
- [36] H. Woo, C. Bone, K. Nadeem, et S. W. Taylor, « Influence of mountain pine beetle outbreaks on large fires in British Columbia », *Ecosphere*, vol. 15, no 1, p. e 4722, 2024, doi : 10.1002/ecs2.4722.
- [37] M. A. Wulder, C. C. Dymond, J. C. White et B. Erickson, « Detection, mapping, and monitoring of the mountain pine beetle », dans *The mountain pine beetle : a synthesis of biology, management, and impacts on lodgepole pine*, Victoria, Colombie-Britannique : Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, 2006. Consulté : Février 2025. [En ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/287218/publication.html>
- [38] W. G. Page, M. E. Alexander, et M. J. Jenkins, « Wildfire's resistance to control in mountain pine beetle-attacked lodgepole pine forests », *For. Chron.*, vol. 89, no. 06, pp. 783–794, déc. 2013, doi : 10.5558/tfc2013-141.
- [39] R. Brett, « Forest Insect and Disease Surveys of Jasper National Park, 2010–2020 (non publié) », Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, 2020.
- [40] B. C. Bright, A. T. Hudak, A. J. H. Meddens, T. J. Hawbaker, J. S. Briggs, et R. E. Kennedy, « Prediction of Forest Canopy and Surface Fuels from Lidar and Satellite Time Series Data in a Bark Beetle-Affected Forest », *Forests*, vol. 8, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2017, Doi : 10.3390/f8090322.
- [41] T. Skretting, L. Chasmer, C. J. Watson, P. M. A. James, I. Townshend, et D. D. B. Perrakis, « Forest fuel structure and loading along a gradient of gray-phase mountain pine beetle severity in Jasper National Park, Alberta, Canada », *Can. J. For. Res.*, vol. 55, p. 1–14, janv. 2025, doi : 10.1139/cjfr-2024-0319.
- [42] M. J. Jenkins, J. B. Runyon, C. J. Fettig, W. G. Page, et B. J. Bentz, « Interactions among the Mountain Pine Beetle, Fires, and Fuels », *For. Sci.*, vol. 60, no 3, p. 489–501, Jun. 2014, doi : 10.5849/forsci.13-017.
- [43] J. A. Hicke, M. C. Johnson, J. L. Hayes, et H. K. Preisler, « Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire », *For. Ecol. Manag.*, vol. 271, p. 81–90, mai 2012, doi : 10.1016/J.foreco.2012.02.005.
- [44] J. Ren et al., « Bark beetle effects on fire regimes depend on underlying fuel modifications in semiarid systems », Earth and Space Science Open Archive. Consulté : 28 mars 2022. [En ligne]. Disponible : <http://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10510802.1>

- [45] S. L. Stephens, A. A. Bernal, B. M. Collins, M. A. Finney, C. Lautenberger, et D. Saah, « Mass fire behavior created by extensive tree mortality and high tree density not predicted by operational fire behavior models in the southern Sierra Nevada », *For. Ecol. Manag.*, vol. 518, p. 120258, août 2022, doi : 10.1016/J.foreco.2022.120258.
- [46] R. E. Keane, « Describing wildland surface fuel loading for fire management: a review of approaches, methods and systems », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 22, no 1, p. 51–62, Août. 2012, doi : 10.1071/WF11139.
- [47] W. A. Kurz *et al.*, « Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change », *Nature*, vol. 452, no 7190, p. 987–990, Avr. 2008, doi : 10.1038/nature06777.
- [48] A. J. H. Meddens, J. A. Hicke, et C. A. Ferguson, « Spatiotemporal patterns of observed bark beetle-caused tree mortality in British Columbia and the western United States », *Ecol. Appl.*, vol. 22, no. 7, p. 1876–1891, 2012, doi : 10.1890/11-1785.1.
- [49] B. M. Wotton, M. E. Alexander et S. W. Taylor, « Mises à jour et révisions de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt de 1992 », Service canadien des forêts, Sault Ste Marie, Ontario, GLC-X-10, 2009. Consulté : Le 3 décembre 2019. [en ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/9.628100/publication.html>
- [50] J. K. Agee et C. N. Skinner, « Basic principles of forest fuel reduction treatments », *For. Ecol. Manag.*, vol. 211, no 1, p. 83–96, Juin. 2005, doi : 10.1016/J.foreco.2005.01.034.
- [51] s. T. McKinney, I. Abrahamson, T. Jain, et N. Anderson, « A systematic review of empirical evidence for landscape-level fuel treatment effectiveness », *Fire Ecol.*, vol. 18, no. 1, p. 21, Sep. 2022, Doi : 10.1186/s42408-022-00146-3.
- [52] J. L. Beverly, S. E. R. Leverkus, H. Cameron, et D. Schroeder, « Stand-Level Fuel Reduction Treatments and Fire Behaviour in Canadian Boreal Conifer Forests », *Fire*, vol. 3, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2020, Doi : 10.3390/feu3030035.
- [53] T. Banerjee, « Impacts of Forest Thinning on Wildland Fire Behavior », *Forests*, vol. 11, no 9, Art. 9, Sep. 2020, Doi : 10.3390/f11090918.
- [54] P. E. Vézina et GY. Péché, « Solar Radiation Beneath Conifer Canopies in Relation to Crown Closure », *For. Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 443–451, déc. 1964, doi : 10.1093/forestscience/10.4.443.
- [55] B. E. Potter, « A dynamics based view of atmosphere–fire interactions », *Int. J. Wildland Fire*, vol. 11, no 4, p. 247–255, 2002, doi : 10.1071/wf02008.
- [56] C. Van Wagner, *Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo*, vol. 35. Ottawa : Service canadien des forêts, 1987. Consulté : Le 13 décembre 2019. [en ligne]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/entities/publication/3190835d-b51b-4d90-acff-504170d983d2>
- [57] B. D. Lawson et O. B. Armitage, *GWeather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. 2008. Consulté : 19 févr. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=29152>
- [58] B. M. Wotton, « Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications », *Environ. Ecol. Stat.*, vol. 16, no 2, p. 107–20131, Jun. 2009, doi : 10.1007/s10651-007-0084-2.
- [59] B. S. Lee, M. E. Alexander, B. C. Hawkes, T. J. Lynham, B. J. Stocks, et P. Englefield, « Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 37, no 1, p. 185–198, déc. 2002, doi : 10.1016/S0168-1699(02)00120-5.
- [60] Groupe de travail sur les dangers d'incendie du Service canadien des forêts, *de la prochaine génération de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt*. dans le Rapport d'information, GLC-X-26. Sault Ste Marie, Ontario : Service canadien des forêts, 2021. Consulté : Nov. 04, 2021. [En ligne]. Disponible : <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=40474>
- [61] B. D. Lawson et G. N. Dalrymple, « Probabilities of sustained flaming ignition: lodgepole pine, interior douglas-fir and white spruce-subalpine fir forests. Supplement to Field guide to Canadian forest fire behavior prediction (FBP) system », Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique, FRDA Handbook 012 supplement, 1998.
- [62] D. J. McRae, B. J. Stocks, et C. J. Ogilvie, « Fire acceleration on large-scale convection burns », 1989, Consulté : 18 déc. 2024. [Online]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/234362>
- [63] S. W. Taylor et M. E. Alexander, *Guide de la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI)*, troisième édition dans le rapport spécial, no 11. Edmonton, Canada : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 2018. Consulté : Av. 03 avril 2020. [En ligne]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/entities/publication/0e22f3aa-7bef-4be5-96a5-27568da7acdf>
- [64] D. McRae et M. D. Flannigan, « Development of large vortices on prescribed fires », *Can. J. For. Res.*, vol. 20, no 12, p. 1878–1887, déc. 1990, doi : 10.1139/x90-252.
- [65] K. A. Anyomi, S. J. Mitchell, et J.-C. Ruel, « Windthrow modelling in old-growth and multi-layered boreal forests », *Ecol. Model.*, vol. 327, pp. 105–114, mai 2016, doi : 10.1016/J.ecolmodel.2016.02.003.
- [66] D. Burgess *et coll.*, « 20 May 2013 Moore, Oklahoma, Tornado: Damage Survey and Analysis, *Weather Forecast*, vol. 29, no. 5, p. 1229–1237, Oct. 2014, doi : 10.1175/WAF-D-14-00039.1.
- [67] G. Baxter, M. Richards, et C. Tymstra, « A wildland-urban post-fire case study: The Grouse Complex », Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 77, 2024. Consulté : Jul. 24, 2025. [En ligne]. Disponible : <https://www.iclr.org/wp-content/uploads/2024/11/Grouse-Complex-WU-Fires-N.pdf>

- [68] S. Treacy, [68] S. Treacy, « The Impact of Wildfire Smoke on Solar Photovoltaic Power Generation in Alberta, Canada », Université de Lisbonne, Lisbonne, Portugal, 2024. Consulté : 24 décembre 2024. [en ligne]. Disponible : <https://www.proquest.com/openview/dfb0900032a4a10df0653d34cde83b53/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=CGC>
- [69] G. M. Byram et G. M. Jemison, « Solar radiation and forest fuel moisture », *J. Agric. Res.*, vol. 67, no. 4, p. 149–176, 1943.
- [70] M. E. Alexander, « Surface fire spread potential in trembling aspen during summer in the Boreal Forest Region of Canada », *For. Chron.*, vol. 86, no 2, p. 200–212, Avr. 2010, doi : 10.5558/tfc86200-2.
- [71] S. M. Steber, « Ignition Devices, » dans *l'Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, Springer, Cham, 2020, p. 1 à 6. doi : 10.1007/978-319-51727-8_202-1.
- [72] D. J. McRae, « Prescribed fire aerial ignition strategies, » Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie, Ontario, NODA/NFP Technical Report TR-33, 1996. Consulté : 25 août 2023. [En ligne]. Disponible : <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=9557>
- [73] R. R. Linn, Y. Kim, S. C. Goodrick, et J. K. Hiers, « Pyrocumulus Collapse : Unpredicted Wildfire Dangers. » OSTI, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.osti.gov/servlets/purl/1228078>
- [74] F. A. Albini, M. E. Alexander, et M. G. Cruz, « A mathematical model for predicting the maximum potential spotting distance from a crown fire, » *Int. J. Wildland Fire*, vol. 21, no 5, p. 609–2027, août 2012, doi : 10.1071/WF11020.
- [75] J. M. Canfield, “Wildfire dynamics: Understanding some behavior trends,” Florida State University, 2014. Consulté : 18 déc. 2024. [Online]. Disponible : <https://www.proquest.com/openview/b7ab49671141ff81d3dd8c81e96ca5bd/1?cbl=18750&pq-origsite=gscholar>
- [76] A. Filkov *et coll.*, « Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest, » *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no 2, p. 3263–3270, janv. 2017, doi : 10.1016/J.proci.2016.06.125.
- [77] D. K. Thompson *et coll.*, « Quantifying Firebrand Production and Transport Using the Acoustic Analysis of In-Fire Cameras, » *Fire Technol.*, févr. 2022, doi : 10.1007/s 10694-021-01194– y.
- [78] S. L. Manzello, S. Suzuki, M. J. Gollner, et A. C. Fernandez-Pello, « Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread, » *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 76, p. 100801, janv. 2020, doi : 10.1016/J.pecs.2019.100801.
- [79] R. Wadhwani, C. Sullivan, A. Wickramasinghe, M. Kyng, N. Khan, et K. Moinuddin, “A review of firebrand studies on generation and transport,” *Fire Saf. J.*, vol. 134, p. 103674, décembre 2022, doi : 10.1016/J.firesaf.2022.103674.
- [80] J. E. Keeley, “Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage,” *Int. J. Wildland Fire*, vol. 18, no 1, p. 116–126, Mar. 2009, doi : 10.1071/WF07049.
- [81] N. O. Soverel, D. D. B. Perrakis, et N. C. Coops, « Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada, » *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no 9, p. 1896– 1909, Sep. 2010, Doi : 10.1016/J.rse.2010.03.013.
- [82] S. J. Saberi et B. J. Harvey, “What is the color when black is burned? Quantifying (re)burn severity using field and satellite remote sensing indices,” *Fire Ecol.*, vol. 19, no. 1, p. 24, avr. 2023, doi : 10.1186/s42408-023-00178-3.
- [83] M. E. Alexander et M. G. Cruz, « Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height, » *Int. J. Wildland Fire*, vol. 21, no 2, p. 95–113, avr. 2012, doi : 10.1071/WF11001.
- [84] C. de Ronde et J. G. Goldammer, *Wildfire Investigation : Guidelines for Practitioners*. Kessel Publishing House, 2015.
- [85] M. E. Alexander, M. G. Cruz, et S. W. Taylor, « Crown Scorch Height, » dans *Encyclopedia of Wildland and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, S. L. Manzello, Éd., Cham : Springer International Publishing, 2018, pp. 1–7. doi : 10.1007/978-319-51727-8_72-1.
- [86] T. N. Skretting, « Impacts of mountain pine beetle outbreak and wildland fuel reduction treatments in Jasper National Park, Alberta, Canada, » Lethbridge, Alta. : Université de Lethbridge, Dépt de la géographie et de l'environnement, 2024. Consulté : 9 déc. 2024. [En ligne]. Disponible : <https://hdl.handle.net/10133/6941>
- [87] A. C. Talucci et M. A. Krawchuk, « Dead forests burning: the influence of beetle outbreaks on fire severity and legacy structure in sub-boreal forests, » *Ecosphere*, vol. 10, no. 5, p. e 02744, 2019, doi : 10.1002/ecs2.2744.
- [88] W. J. de Groot, J. M. Pritchard, et T. J. Lynham, « Forest floor fuel consumption and carbon emissions in Canadian boreal forest fires, » *Can. J. For. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 367–382, févr. 2009, doi : 10.1139/X08-192.
- [89] K. G. Hirsch et I. Pengelly, « Fuel reduction in lodgepole pine stands in Banff National Park, » dans les *Proceedings of the Joint Fire Science Conference and Workshop*, Boise, Idaho : International Association of Wildland Fire, 1999, p. 251–257 (Vol. II). [En ligne]. Disponible : <https://ostrnrcan-dostnrcan.canada.ca/handle/1845/227936>
- [90] J. M. Johnston *et al.*, « Direct estimation of Byram's fire intensity from infrared remote sensing imagery, » *Int. J. Wildland Fire*, vol. 26, no 8, p. 668–684, Juin 2017, doi : 10.1071/WF16178.
- [91] K. G. Hirsch, P. N. Corey, et D. L. Martell, « Using Expert Judgment to Model Initial Attack Fire Crew Effectiveness, » *For. Sci.*, vol. 44, no 4, p. 539–549, nov. 1998, doi : 10.1093/forestscience/44.4.539.

- [92] C. McFayden *et al.*, « Reference Guide to the Drop Effectiveness of Skimmer and Rotary Wing Airtankers, » Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie, 2023. Consulté : Le 31 août 2023. [En ligne]. Disponible : <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=41009>
- [93] B. W. Butler, M. A. Finney, P. L. Andrews, et F. A. Albini, « A radiation-driven model for crown fire spread, » *Can. J. For. Res.*, vol. 34, no 8, p. 1588-2099, août 2004, doi : 10.1139/x04-074.
- [94] D. D. Perrakis, R. A. Lanoville, S. W. Taylor et D. Hicks, « Modeling Wildfire Spread in Mountain Pine Beetle-Affected Forest Stands, British Columbia, Canada, » *Fire Ecol.*, vol. 10, no 2, art. 2, août 2014, doi : 10.4996/fireecology.1002010.
- [95] M. E. Alexander *et al.*, *Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME)*. Information Report, no NOR-X-393. Edmonton, Canada : Service canadien des forêts, 2004. Consulté : 21 mai 2020. [En ligne]. Disponible : <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=24913>
- [96] B. J. Stocks *et al.*, « Crown fire behaviour in a northern jack pine-black spruce forest, » *Can. J. For. Res.*, vol. 34, no 8, p. 1548-1560, août 2004, doi : 10.1139/x04-054.
- [97] C. Tymstra, R. W. Bryce, B. M. Wotton, S. W. Taylor, et O. B. Armitage, *Development and structure of Prometheus : the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. Edmonton : Service canadien des forêts, 2010. Consulté : Jun. 02, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/9.568367/publication.html>
- [98] M. R. Gallagher *et al.*, « Reconstruction of the Spring Hill Wildfire et Exploration of Alternate Management scenarios Using QUIC-Fire, » *Fire*, vol. 4, no. 4, art. 4, déc. 2021, doi : 10.3390/fire4040072.
- [99] J. M. Reisner *et al.*, « Informed Multi-Scale Approach Applied to the British Columbia Fires of Late Summer 2017, » *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 128, no. 5, p. e 2022JD037238, 2023, doi : 10.1029/2022JD037238.
- [100] R. Linn *et al.*, « Incorporating field wind data into FIRETEC simulations of the International Crown Fire Modeling Experiment (ICFME): preliminary lessons learned, » *Canada. J. For. Res.*, vol. 42, no 5, p. 879–898, mai 2012, doi : 10.1139/x2012-038.
- [101] R. R. Linn *et coll.*, « Modeling Low Intensity Fires: Lessons Learned from 2012 RxCADRE, » *Atmosphere*, vol. 12, no 2, Art. 2, Art. 2021, doi : 10.3390/atmos12020139.
- [102] R. Linn, J. Reisner, J. J. Colman, et J. Winterkamp, « Studying wildfire behavior using FIRETEC, » *Int. J. Wildland Fire*, vol. 11, no 4, p. 233-2046, 2002, doi : 10.1071/wf02007.
- [103] R. Linn *et coll.*, « QUIC-fire: A fast-running simulation tool for prescribed fire planning, » *Environ. Model. Softw.*, vol. 125, p. 104616, mars 2020, doi : 10.1016/J.envsoft.2019.104616.
- [104] K. Luo, X. Wang, M. de Jong, et M. Flannigan, « Drought triggers and sustains overnight fires in North America, » *Nature*, vol. 627, no 8003, p. 321-2027, Mar. 2024, doi : 10.1038/s41586-024-07028-5.
- [105] m. G. Cruz et M. E. Alexander, « The 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread in forests and shrublands, » *Ann. For. Sci.*, vol. 76, no 2, p. 44, avril 2019, doi : 10.1007/s13595-019-0829-8.
- [106] D. D. B. Perrakis *et al.*, « Improved logistic models of crown fire probability in Canadian conifer forests, » *Int. J. Wildland Fire*, août 2023, doi : 10.1071/WF23074.
- [107] M. C. Kirchmeier-Young, N. P. Gillett, F. W. Zwiers, A. J. Cannon, et F. S. Anslow, « Attribution of the Influence of Human-Induced Climate Change on an Extreme Fire Season, » *Earths Future*, vol. 7, no. 1, pp. 2– 10, 2019, doi : 10.1029/2018EF001050.
- [108] W. Wang *et al.*, « Canadian forests are more conducive to high-severity fires in recent decades, » *Science*, vol. 387, no 6729, p. 91-97, janv. 2025, doi : 10.1126/science.ado1006.
- [109] S. G. Cumming, « Effective fire suppression in boreal forests, » *Can. J. For. Res.*, vol. 35, no 4, p. 772-786, Avr. 2005, doi : 10.1139/x04-174.
- [110] M. C. Arienti, S. G. Cumming et S. Boutin, « Empirical models of forest fire initial attack success probabilities: the effects of fuels, anthropogenic linear features, fire weather, and management, » *Can. J. For. Res.*, vol. 36, no 12, p. 3155–3166, déc. 2006, doi : 10.1139/x06-188.
- [111] J. Reimer, D. K. Thompson, et N. Povak, « Measuring Initial Attack Suppression Effectiveness through Burn Probability, » *Fire*, vol. 2, no 4, p. 60, décembre 2019, doi : 10.3390/fire2040060.
- [112] S. W. Taylor, « Atmospheric Cascades Shape Wildfire Activity and Fire Management Decision Spaces Across Scales – A Conceptual Framework for Fire Prediction, » *Front. Environ. Sci.*, vol. 8, 2020, doi : 10.3389/fenvs.2020.527278.
- [113] J. K. Balch *et al.*, « The fastest-growing and most destructive fires in the US (2001 to 2020), » *Science*, vol. 386, no 6720, p. 425–431, octobre 2024, doi : 10.1126/science.adk5737.
- [114] D. E. Calkin, J. D. Cohen, M. A. Finney, et M. P. Thompson, « How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface, » *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 111, no 2, p. 746–751, Jan. 2014, doi : 10.1073/PNAS.1315088111.
- [115] D. E. Calkin, K. Barrett, J. D. Cohen, M. A. Finney, S. J. Pyne, et S. L. Quarles, « Wildland-urban fire disasters aren't actually a wildfire problem, » *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 120, no 51, p. e 2315797120, déc. 2023, doi : 10.1073/PNAS.2315797120.

- [116] Conseil canadien des ministres des forêts, *Dialogue canadien sur les feux de forêt et la résilience des forêts : le rapport « Ce que nous avons entendu », printemps 2022..* Ottawa : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 2022. Consulté : Juin 2022. [En ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/9.911611/publication.html>
- [117] S. W. Taylor, L. D. Daniels, K. Copes-Gerbitz, et K. Forbes, « Wildfires, » dans *Resilient pathways report : co-creating new knowledge for understanding risk and resilience in British Columbia OPEN FILE 8910 / edited by S. Safaie, S. Johnstone, and N.L. Hastings.*, Commission géologique du Canada, 2022. Consulté : Avr. 07, 2025. [En ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/9.913842/publication.html>
- [118] D. K. Thompson, J. Studens, C. Krezek-Hanes, et B. M. Wotton, "The impact of root exclusion on duff moisture and fire danger," *Can. J. For. Res.*, vol. 45, no. 8, pp. 978–986, mars 2015, doi : 10.1139/cjfr-2014-0397.
- [119] H. Hart, D. D. B. Perrakis, S. W. Taylor, C. Bone, et C. Bozzini, « Georeferencing Oblique Aerial Wildfire Photographs: An Untapped Source of Fire Behaviour Data, » *Fire*, vol. 4, no 4, art. 4, déc. 2021, doi : 10.3390/feu4040081.
- [120] C. Bozzini, M. Conedera, et P. Krebs, « A New Monoplotting Tool to Extract Georeferenced Vector Data and Orthorectified Raster Data from Oblique Non-Metric Photographs, » *Int. J. Herit. Digit. Era*, vol. 1, no. 3, pp. 499–518, sep. 2012, Doi : 10.1260/2047-4970.1.3.499.
- [121] Ressources naturelles Canada, « Modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) – Série CanÉlévation » 2024. Consulté : Février 2025. [En ligne]. Disponible : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995>
- [122] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, et R. Moore, « Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, » *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, p. 18-2027, décembre 2017, doi : 10.1016/J.rse.2017.06.031.
- [123] C. H. Key et N. C. Benson, « Landscape Assessment (LA), » dans *FIREMON : Fire effects monitoring and inventory system*, dans Gen. Tech. Rep., no. RMRS-GTR-164-CD., Fort Collins, CO : Department of Agriculture, Forest Service des États-Unis, Rocky Mountain Research Station, 2006. Consulté : 4 oct. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/24066>
- [124] J. Boucher et coll., « Sampling fuels dans le contexte du next-generation Canadian Fire hazard rating System, » Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 2023. [En ligne]. Disponible : https://ca.nfis.org/fss/fss?command=retrieveByName&fileName=Field_Guide_of_NG_Protocol.pdf&fileNameSpace=docs/nfi&format=xml&promptToSave=true
- [125] C. Klein et F. Vilčko, « A new empirical approach for estimation in *k*-tree sampling, » *For. Ecol. Manag.*, vol. 237, no 1, p. 522–533, déc. 2006, doi : 10.1016/J.foreco.2006.09.072.
- [126] C.– H. Ung, P. Bernier, et X.– J. Guo, « Canadian national biomass equations : new parameter estimates that include British Columbia data, » *Can. J. For. Res.*, avril 2008, doi : 10.1139/X07-224.
- [127] D. B. Perrakis, G. Eade, et D. Hicks, *British Columbia Wildfire Fuel Typing and Fuel Type Layer Description*. 2018. Consulté : 5 nov. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=39432>
- [128] S. Lacarte, « Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF) Types de combustibles pour la prévision du comportement des incendies (PCI) 2024, 30 m » Ouvert Canada, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/4e66dd2f-5cd0-42fd-b82c-a430044b31de>
- [129] J. Wierzchowski, M. Heathcott, et M. D. Flannigan, « Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada, » *Int. J. Wildland Fire*, vol. 11, no 1, p. 41–51, 2002, doi : 10.1071/wf01048.
- [130] E. S. Hope et al., "Exploring the use of satellite Earth observation active wildland fire hotspot data via open access web platforms," *Int. J. Digit. Earth*, vol. 17, no 1, p. 2420821, déc. 2024, doi : 10.1080/17538947.2024.2420821.
- [131] B. Ramachandran, K. Chiang, et G. Lin, « NASA Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Level-1B Product User Guide. » NASA Goddard Space Flight Center, 2021. doi : 10.5067/VIRS/VJ103IMG.021.
- [132] W. Schroeder, P. Oliva, L. Giglio, et I. A. Csizar, « The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment, » *Remote Sens. Environ.*, vol. 143, p. 85-96, mars 2014, doi : 10.1016/J.rse.2013.12.008.
- [133] Gouvernement de l'Alberta, « Final documentation report Chisholm fire (LWF-063), » Alberta Sustainable Resource Development, Forest Protection Division, Edmonton, Canada, 2001. Consulté : Le 31 janvier 2023. [En ligne]. Disponible : <https://open.alberta.ca/publications/0778518418>

Annexe A – Méthodologie

A1. Estimation du séchage de la couverture forestière supplémentaire dû à la perte de couverture causée par le DPP

Ce rapport a déjà montré que l'ICD au moment de l'allumage était la valeur la plus élevée enregistrée pour cette période de l'année. Cependant, l'ICD a probablement sous-estimé à quel point le séchage au niveau de la couverture forestière était anormal par rapport à la climatologie historique en raison de la mortalité récente du couvert forestier causée par le dendroctone du pin ponderosa (DPP). Comme mentionné dans la Section 2.2, Jasper a subi une attaque sévère du DPP qui a atteint son sommet environ sept ans avant l'incendie. La perte importante de feuillage causée par cette attaque a accru le rayonnement solaire et le vent au niveau du sol forestier, deux facteurs qui favorisent le dessèchement des combustibles. Cependant, le système IFM suppose une couverture de couvert modérée et ne peut pas être facilement ajusté pour tenir compte de ces changements dans les peuplements. Dans cette section, nous décrivons une approche pour estimer un « ICD amélioré » qui prend en compte ce séchage supplémentaire résultant de la mortalité du couvert.

Pour estimer le dessèchement accru, nous avons d'abord utilisé les relevés de végétation des peuplements touchés par le dendroctone du pin DPP recueillis par [86] ainsi que des équations allométriques standard pour estimer la couverture du couvert comme décrite par l'Indice de superficie végétale. Cette valeur de l'indice de superficie végétale, ainsi que les conditions météorologiques historiques ouvertes observées à la station météorologique de Jasper Warden, ont été utilisées pour forcer une série de modèles (décrits dans [118]) pour simuler les microclimats sous la canopée dans des conditions de site ouvert et de couverture de canopée. Ces conditions microclimatiques ont ensuite été utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) au niveau du sol forestier.

Les relevés de végétation ont également identifié des arbres qui avaient perdu leurs aiguilles en raison du DPP (« attaque grise »). Nous avons ainsi pu modéliser l'ETP sous couvert pour un scénario contrefactuel où l'attaque de dendroctone du pin (DPP) n'aurait pas eu lieu, en réintégrant la biomasse d'aiguilles dans le calcul de l'indice de superficie végétale. Nous avons ensuite sélectionné un peuplement avec une couverture de canopée pré-DPP modérée qui ressemblait le plus aux peuplements de pins idéaux utilisés lors du

développement des indices IFM. En utilisant 62 ans de données météorologiques de site ouvert provenant de la station météorologique de Jasper Warden, nous avons calculé l'ETP total quotidien sous le couvert pour les cas DPP et non DPP et calculé un pourcentage moyen d'augmentation de l'ETP quotidien pour le cas DPP par rapport au cas non DPP.

En raison de la relation exponentielle entre l'Indice de l'humus (IH) et l'humidité de la litière [9], on peut supposer que le taux de séchage logarithmique de l'IH est linéairement lié à l'ETP. De plus, nous avons supposé que la norme ICD reflétait les conditions au sein du peuplement à capacité modérée pour l'affaire non DPP. Compte tenu de ces deux hypothèses, nous avons appliqué le pourcentage d'augmentation de l'ETP quotidienne calculé à l'étape précédente au taux de séchage logarithmique de l'IH dans le scénario sans DPP (l'ICD standard) afin d'estimer un « ICD amélioré » tenant compte du potentiel accru de dessèchement dans les peuplements touchés par le DPP.

A2. Analyse de la progression d'incendie

La délimitation de la position de la ligne d'incendie hautement précise est possible en utilisant des photographies d'incendies de végétation aériens en combinaison avec des techniques de photogrammétrie. Ce processus de monoplott dans le contexte de la reconstruction du comportement d'incendie implique la géoréférence des photographies obliques en utilisant des modèles numériques d'altitude (MNA) et l'orthophotographie; il peut être utilisé pour analyser la progression d'incendie et identifier les caractéristiques du comportement d'incendie telles que la vitesse de propagation [119]. La technique de monoplottage a été utilisée sur l'incendie South Fire à partir de photographies sélectionnées prises par des observateurs lors de vols de reconnaissance ou d'évacuation, à différents moments et endroits entre le 22 et le 24 juillet (**Figure 10, Figure 12, Figure 14, Figure 15, Figure 17 et Figure 21**). Des photos avec des vues dégagées du périmètre de l'incendie (front, flanc ou arrière) ont été analysées (Tableau S-1) en utilisant l'outil de monoplottage WSL (MPT) [120], ainsi que des MNA dérivés de LiDAR à 1 m [121] et une orthophotographie de 30 cm collectée en 2020 (gracieuseté de Parcs Canada). Toutes les lignes d'arrêt ont été cartographiées dans une plage de précision de 5 m pour les erreurs moyennes et les erreurs 3D maximales.

Tableau S-1. Informations sur la progression d'incendie, y compris le temps écoulé depuis l'allumage, la date et l'heure de chaque pas de temps, les données d'images utilisées pour l'analyse photogrammétrique (nom de la photo, heure, localisation d'incendie, statut), la source des données (source et commentaires) et l'intervalle chronologique correspondant de l'incendie. Remarque : l'analyse photogrammétrique de certaines images a permis l'extraction d'une combinaison de lieux d'incendie (tête, flanc et dos).

Temps depuis l'allumage	Date	Temps	Nom de la photo	Heure de monoptotage	Lieu d'incendie	État	Source	Commentaires	Intervalle d'incendie
1	2024-07-22	23 h	IMG_5314	20 h 38	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt du MPT	Intervalle chronologique 1
11	2024-07-23	6 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 1
15	2024-07-23	10 h	IMG_0194	9 h 57	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 2
15	2024-07-23	10 h	IMG_0194	9 h 57	Flanc	Inféré	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 2
15	2024-07-23	10 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 2
17	2024-07-23	12 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 2
18	2024-07-23	13 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 2
19	2024-07-23	14 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 2
20	2024-07-23	15 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 3 & 4
21	2024-07-23	16 h	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 3 & 4
24	2024-07-23	19 h	IMG_0266	19 h 14	Retour	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
24	2024-07-23	19 h	IMG_0268	19 h 18	Flanc	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
24	2024-07-23	19 h	IMG_0268	19 h 18	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
25	2024-07-23	20 h	IMG_2322	20 h 30	Front	Inféré	Estimation KML	Ligne d'arrêt d'après combinaison de données de points chauds et destinations Google	Intervalle chronologique 3 & 4
43	2024-07-24	14 h	IMG_0313	14 h 3	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
43	2024-07-24	14 h	IMG_0313	14 h 3	Retour	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
43	2024-07-24	14 h	IMG_0313	14 h 3	Flanc	Inféré	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 3 & 4
43,5	2024-07-24	14 h 30	-	-	-	-	O3	Ligne d'arrêt - données de points chauds seulement	Intervalle chronologique 5.1
44	2024-07-24	15 h	IMG_2289	14 h 57	Front	Inféré	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
44	2024-07-24	15 h	IMG_0909	14 h 47	Front	Inféré	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
44	2024-07-24	15 h	IMG_0909	14 h 47	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
44	2024-07-24	15 h	IMG_2289	14 h 57	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
44	2024-07-24	17 h	IMG_2143	16 h 57	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
46	2024-07-24	17 h	IMG_2138	16 h 55	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
46	2024-07-24	17 h	IMG_2138	16 h 55	Front	Inféré	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
46	2024-07-24	17 h	IMG_2151	17 h 2	Front	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.1
47	2024-07-24	18 h	-	-	-	-	Témoignages et photos	Estimation de la ligne d'arrêt à partir des témoignages et des photos	Intervalle chronologique 5.2
50	2024-07-24	21 h	IMG_8229	20 h 45	Flanc	Inféré	Estimation KML	Ligne d'arrêt d'après combinaison de données de points chauds et destinations Google	Intervalle chronologique 5.3
50	2024-07-24	21 h	IMG_8251	20 h 48	Flanc	Calculé	MPT	Ligne d'arrêt provenant de la combinaison de MPT + points chauds	Intervalle chronologique 5.3

A3. Cartographie de la sévérité d’incendie

Cette annexe décrit les méthodes utilisées pour créer l’analyse de la sévérité d’incendie et la carte dans la section 5.

La cartographie de la sévérité de l’incendie de Jasper a été réalisée à partir d’images Sentinel 2 dans Google Earth Engine [122]. Les images Sentinel 2 ont été recueillies sur deux périodes de 45 jours, à partir du 8 août 2023 (« avant incendie ») et du 8 août 2024 (« après incendie »). Les pixels affectés par le nuage ou la neige ont été masqués des images. L’indice de brûlure normalisé (NBR) a été calculé pour chaque image des collections avant et après l’incendie. Un NBR composite a été obtenu pour chaque

pixel en calculant la médiane du NBR pour les collections avant et après l’incendie. La différence normalisée du ratio de brûlage (dNBR) a ensuite été calculé en soustrayant le NBR composite post-incendie du NBR composite préincendie. La dNBR a été classé en cinq catégories de sévérité d’incendie selon les seuils proposés par [123]. Les descriptions des classes de sévérité d’incendie sont fournies dans le **Tableau S-2**. Les zones de végétation non ligneuse ont été exclues des cartes de sévérité d’incendie, car les classes de sévérité perdent leur signification dans ces zones. Des masques de végétation ligneuse ont été créés en utilisant la couche de couverture terrestre 2020 de la Commission de coopération environnementale pour l’Amérique du Nord.¹⁰

Tableau S-2. Classes de sévérité d’incendie cartographiées pour l’incendie de Jasper. Les classes ont été attribuées selon les seuils de la différence normalisée du ratio de brûlage (dNBR) proposés par Key et Benson. [123].

Valeur de la carte	Classe de sévérité des incendies	Type et impact de l’incendie
1	Non brûlé ou inchangé	Incendie de surface non brûlé ou de faible intensité et éclaté
2	Faible	Incendie de surface de faible intensité avec faible degré de brûlure de la cime dans la couche de couverture
3	Modérée	Incendie de surface de faible intensité avec degré modéré de brûlure de la cime dans la couche de couverture
4	Élevée	Incendie entraînant une brûlure complète de la cime ou une consommation partielle du feuillage de la cime dans la couche de couverture
5	Extrême	Incendie entraînant une consommation complète ou presque complète du feuillage de la cime dans la couche de couverture

¹⁰ Voir <https://www.cec.org/fr/atlas-environnemental-de-lamerique-du-nord/couverture-terrestre-30m-2020/>.

A4. Échantillonnage et calcul de la consommation de combustible

Cette section décrit les méthodes utilisées pour mesurer la consommation de combustible dans les 11 parcelles de terrain. Comme mentionné précédemment (Section 5.2.3), des parcelles détaillées de structure et de charge en combustible ont été mesurées entre 2021 et 2023 par des chercheurs de l'Université de Lethbridge afin d'évaluer le risque d'incendie dans la haute vallée de l'Athabasca et autour de Jasper; par hasard, 18 de ces parcelles ont été brûlées lors de l'incendie South Fire.

Conformément à la norme pour les feux expérimentaux dans la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt, la consommation de combustible a été calculée comme la différence entre la charge en combustible avant et après l'incendie pour les différents composants du complexe combustible [5], en reconnaissant que cela surestime probablement la combustion en flammes (voir également la Section 5.4 pour la discussion sur les combustibles et l'intensité d'incendie). Pour les méthodes d'échantillonnage préalables à la combustion, voir [86]. Les méthodes décrites ici se réfèrent à la réévaluation des parcelles qui a eu lieu lors de la campagne sur le terrain entre le 4 et le 9 août 2024.

Les emplacements des parcelles ont d'abord été localisés par GPS portatifs, estimés exacts à moins de 2 m dans les forêts ouvertes. Une fois le centre de la parcelle marqué, un azimut aléatoire a été choisi pour établir un transect de 40 m afin de mesurer les combustibles ligneux. Les méthodes standard d'intersection planaire ont été utilisées pour mesurer la charge en combustible ligneux par classe de taille, tandis que la charge en humus a été estimée en mesurant la profondeur de l'humus à quatre endroits le long du transect [124]. Les profondeurs ont été converties en valeurs de charge en les multipliant par la densité apparente moyenne de l'humus avant combustion ($0,21 \text{ g/cm}^3$; [86]).

La densité des arbres a été estimée en mesurant la distance du centre des parcelles aux sept arbres les plus proches et en calculant une zone circulaire, comme décrit à [125]. Sur les six arbres les plus proches, l'espèce et l'état (vivant ou mort) ont été identifiés, la hauteur et le diamètre à la hauteur de poitrine ont été mesurés et la fraction brûlée de cime (FBC) a été estimée.

La densité moyenne avant l'incendie était de 791 tiges/ha, excluant les parcelles de traitement du combustible, avec une portée de 200 à 1250 tiges/ha. La densité avant l'incendie dans les parcelles de traitement de carburant était de 675 tiges/ha, 150 tiges/ha et 175 tiges/ha dans les traitements de 2003, 2009 et 2022, respectivement (données de [86]).

La consommation totale de combustible (CTC) a été calculée comme la somme des valeurs de consommation pour les composants de carburant individuels : le sol forestier (litière et débris), les débris ligneux fins ($<7 \text{ cm}$ de diamètre) et les débris ligneux grossiers ($>7 \text{ cm}$ de diamètre) comme noté ci-dessus, ainsi que la biomasse sur pied (perte d'arbres entiers) et le carburant de la canopée. La consommation de biomasse sur pied a été estimée à partir des pertes de densité de la canopée à la suite à un incendie. Les changements de densité ont été calculés comme avant et après; lorsque la densité augmentait ou diminuait de moins de 50/ha, une mesure de bruit était supposée. Des changements plus importants de densité ont été observés comme étant causés par des pertes de chicots morts; bien que les espèces n'étaient pas toujours identifiables, la grande majorité des chicots (avant l'incendie) étaient des pins tordus ravagés par le dendroctone [86]. Le diamètre moyen du pin mort pour la parcelle [86] a donc été utilisé pour estimer la biomasse du tronc, des branches et de l'écorce en utilisant des équations allométriques pour le pin tordu [126]. Pour estimer la consommation de combustibles de la canopée, nous avons d'abord estimé la charge de combustibles de la canopée (CCC) pour chaque parcelle comme la somme de (1) des estimations du feuillage avant l'incendie pour les conifères vivants ou les pins au stade d'attaque rouge (Section 2.2), et (2) des estimations du bois de branches pour les chicots de toutes espèces; les valeurs des arbres ont été mises à l'échelle sur une base superficielle (kg/m^2). La valeur de la CCC a été multipliée par la valeur de la FBC estimée (moyenne de six arbres) pour la parcelle afin d'obtenir la CCC estimée finale. La consommation de bois de souche sur des chicots debout était supposée négligeable, bien que des charbons profonds aient été fréquemment observés.

Annexe B – Renseignements supplémentaires

B1. Types de carburant de la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies forêt (PCI)

Comme indiqué dans la Section 2, le personnel formé à la gestion des incendies attribue généralement 1 ou plusieurs types de carburant de la méthode de PCI pour prédire le comportement des incendies de végétation actifs. Pour aider dans ces affectations de type de combustible, des cartes et des couches de données sont souvent préparées, généralement basées sur des données d'inventaire forestier ou des sources de télédétection. La **Figure S-1** montre la

carte du type de carburant de la méthode de PCI la plus récente (avant l'incendie) extraite d'une couche nationale de carburant de la méthode de PCI. Notez que le type de combustible dominant (« C-3 Pin mature ou pin tordu ») est généralement appliqué aux peuplements de pins vivants [5] et cette attribution de type de combustible ne prend pas en compte les impacts de la mortalité de la couche supérieure causée par le dendroctone du pin ponderosa (Section 2.2). En Colombie-Britannique, par exemple, un récent algorithme de frappe de carburant a suggéré que les types de carburant C-2 ou M-3 seraient les meilleures correspondances pour certains peuplements touchés par le DPP [127].

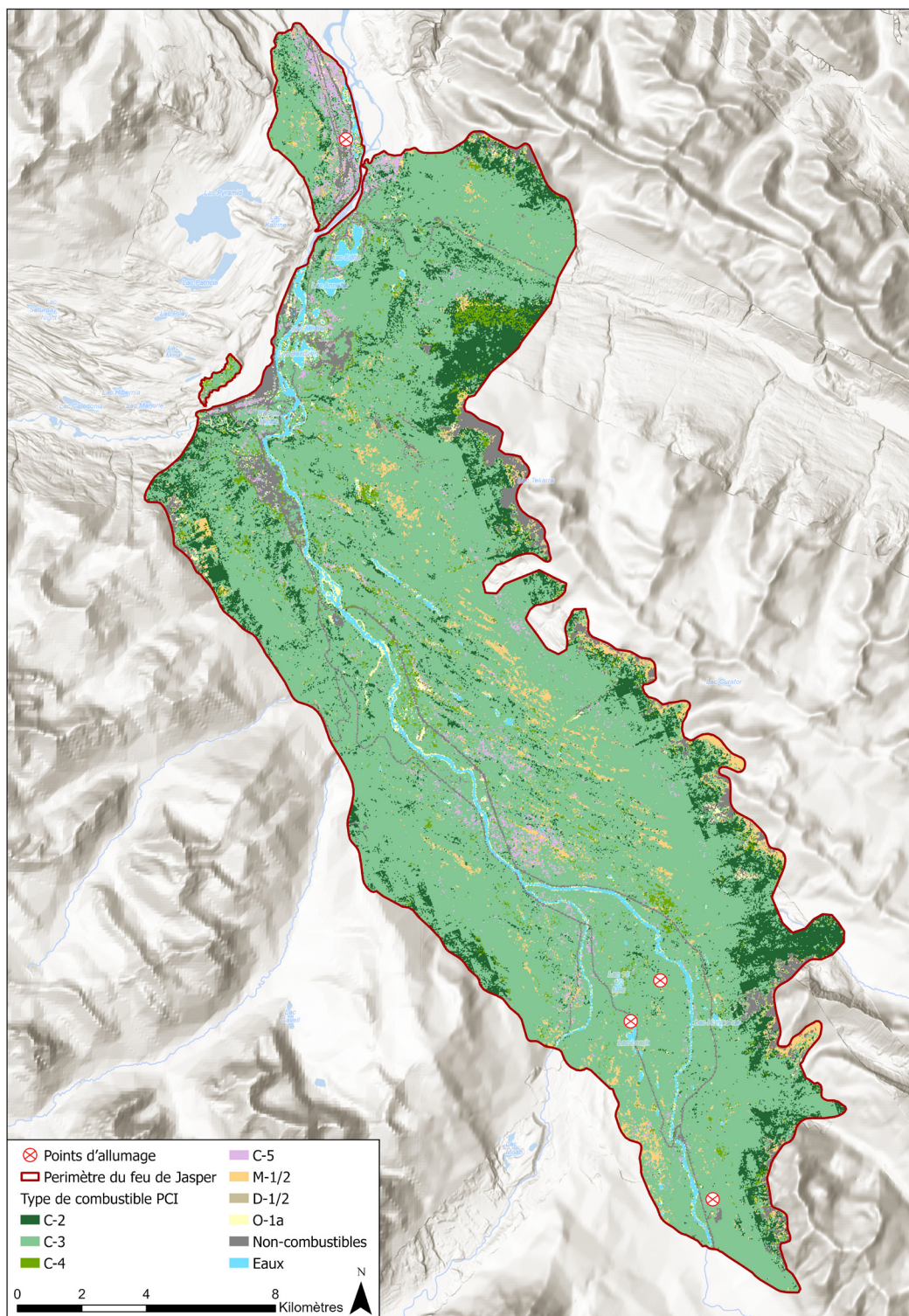


Figure S-1. Carte du type de carburant de la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI) à l'intérieur du complexe d'incendies de Jasper en utilisant la trame nationale de 30 m sur le type de carburant [128]. Cette classification suppose qu'il n'y a aucun impact du dendroctone du pin ponderosa ou de la mortalité des arbres en général.

B2. Climatologie de la foudre

Les informations sur les coups de foudre nuage-sol provenant du Réseau canadien de détection de la foudre démontrent la fréquence de foudre généralement faible à l'intérieur des limites du parc national Jasper [129].

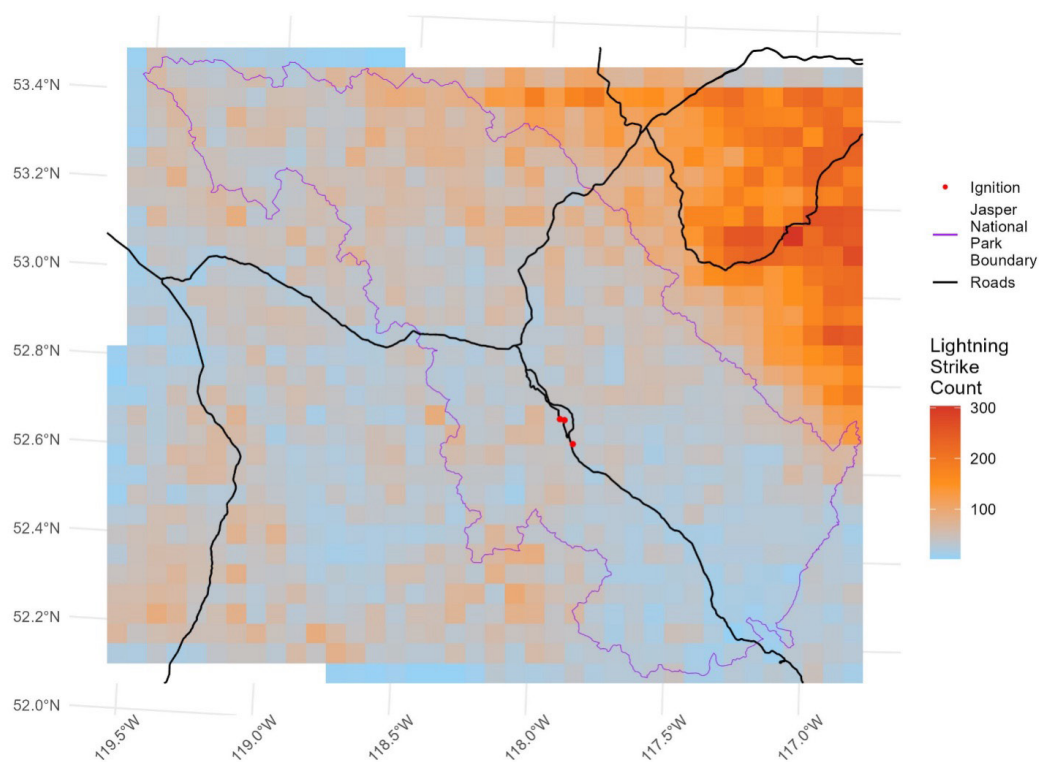


Figure S-2. Nombre cumulé (2015-2024) d'éclairs par cellule de grille de 5 km de large. La limite du parc national Jasper est indiquée en violet, les autoroutes sont représentées par des lignes noires.

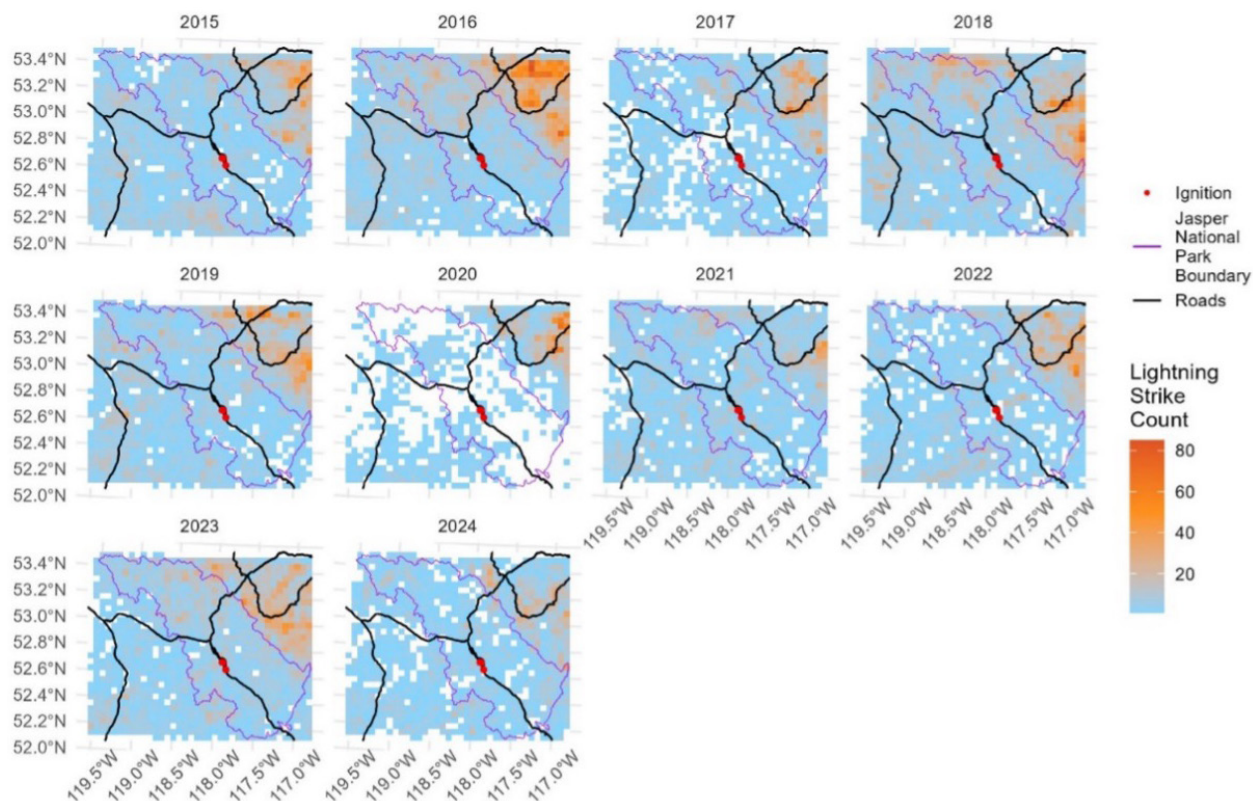


Figure S-3. Tendances annuelles de la densité des éclairs dans le parc national Jasper (contour rouge) de 2015 à 2024. Les valeurs affichées sont le nombre total de coups de foudre par cellule de la grille. La couleur blanche représente aucune détection dans une cellule pour une année donnée.

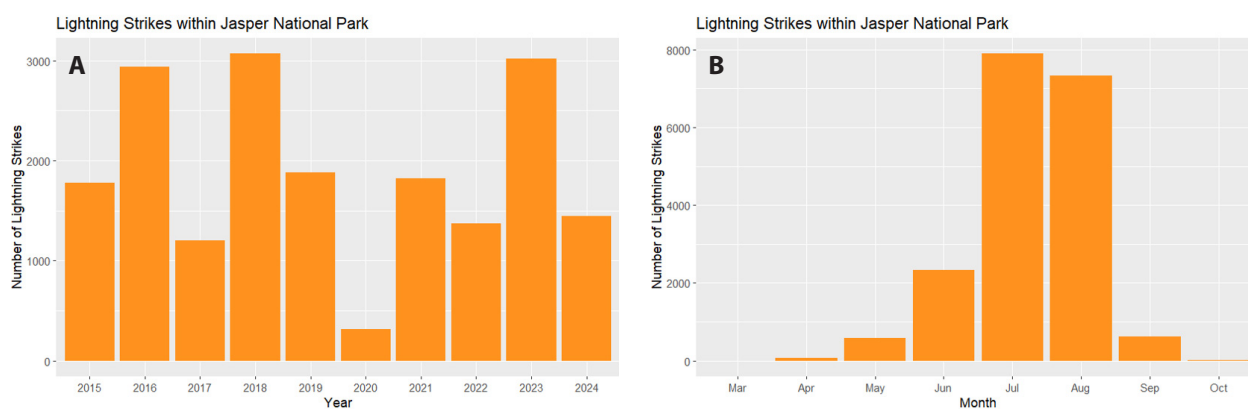


Figure S-4. Résumé des coups de foudre pour le parc national Jasper. **A)** Nombre annuel de coups de foudre nuage-sol dans le parc national Jasper annuel de 2015 à 2024. **B)** Distribution mensuelle des coups de foudre nuage-sol dans le parc national Jasper pendant la saison des incendies.

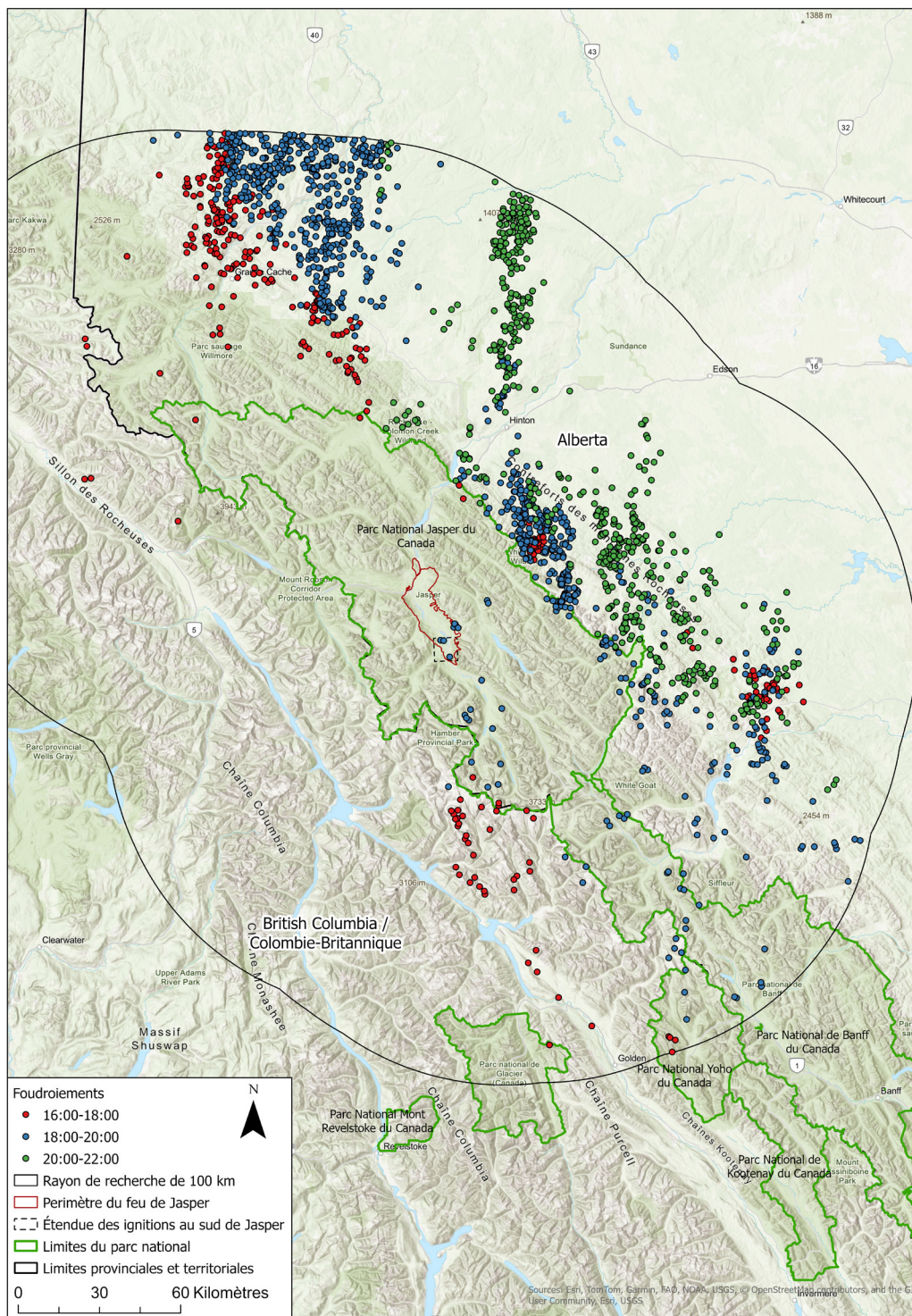


Figure S-5. Des coups de foudre nuage-sol dans les environs du parc national Jasper de 16 h à 22 h, le 22 juillet. Rouge : De 16 h à 18 h; bleu : De 18 h à 20 h; vert : De 20 h à 22 h.

B3. Stabilité atmosphérique

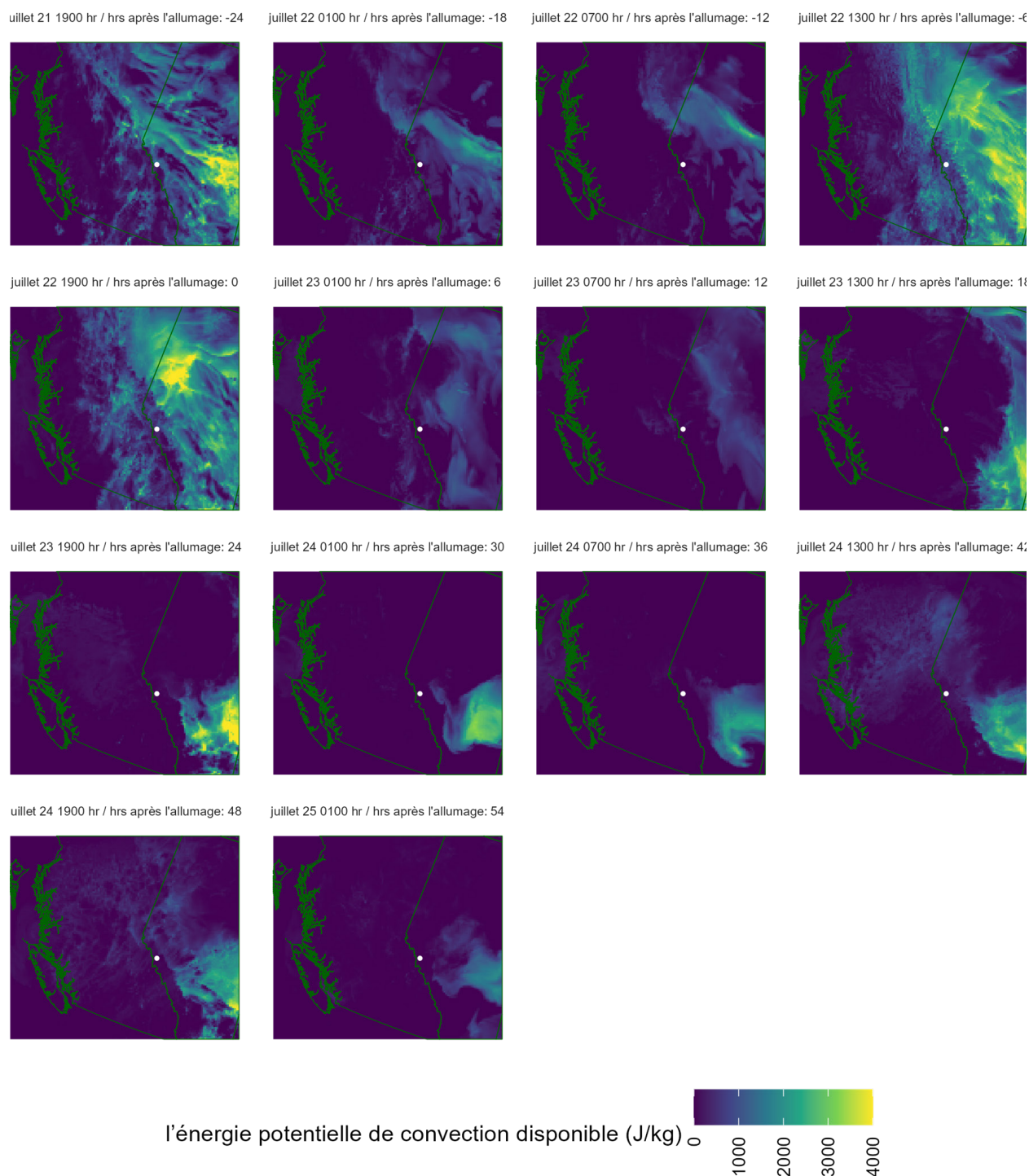


Figure S-6. Énergie potentielle de convection disponible (EPCD) dans l'ensemble du sud de la Colombie-Britannique et l'Alberta. Durant les 12 heures avant et 54 heures après l'allumage. Emplacement de Jasper indiqué par un point blanc. Les heures sont données en HAR.

B4. Cartes modélisées du vent

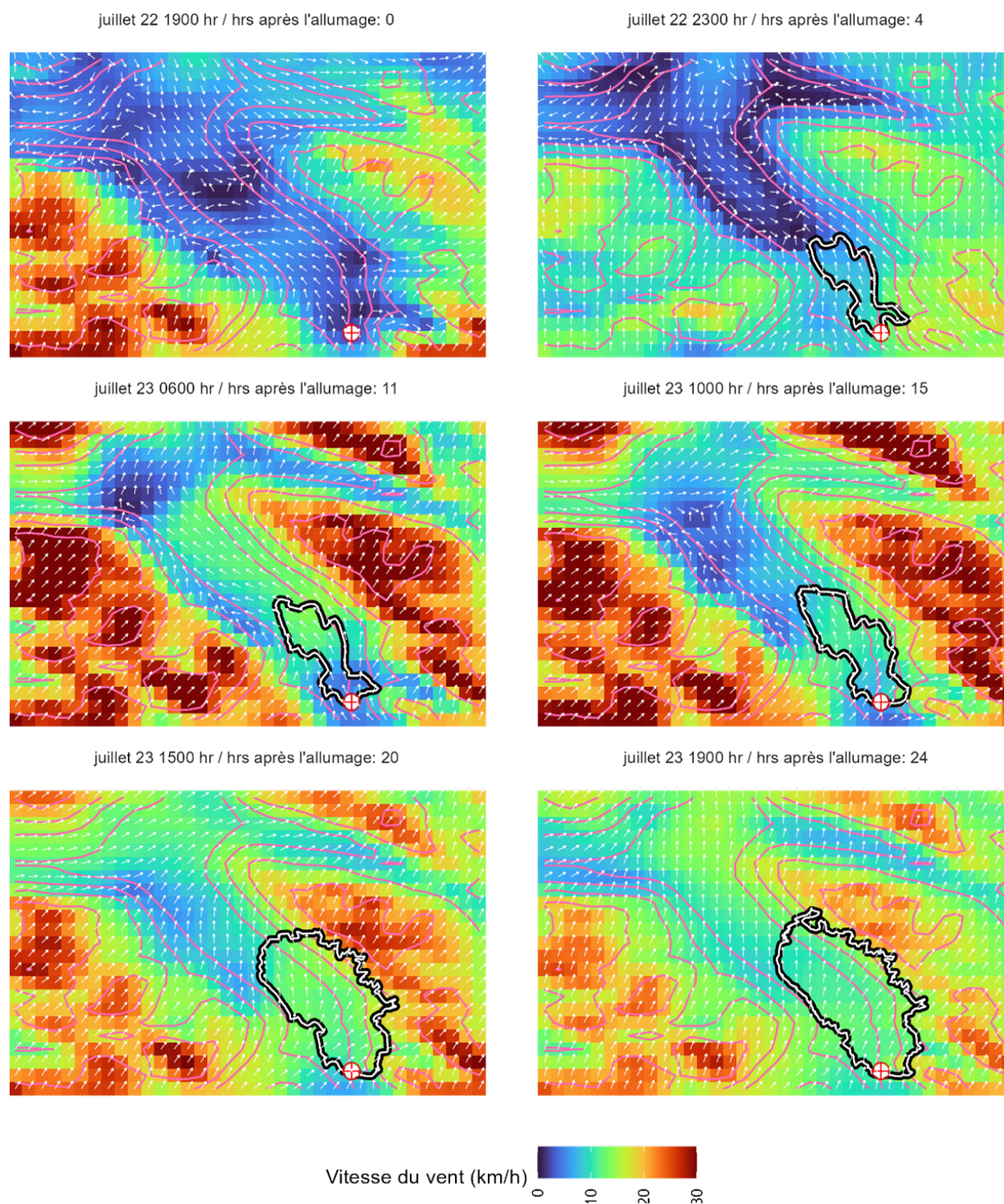
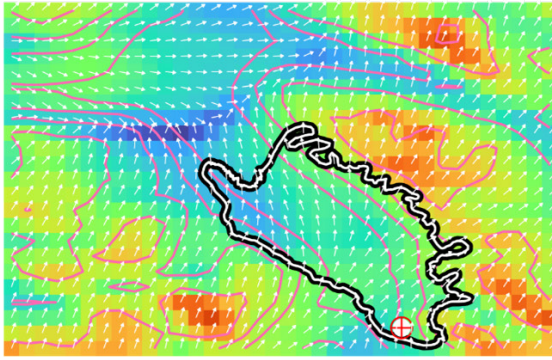
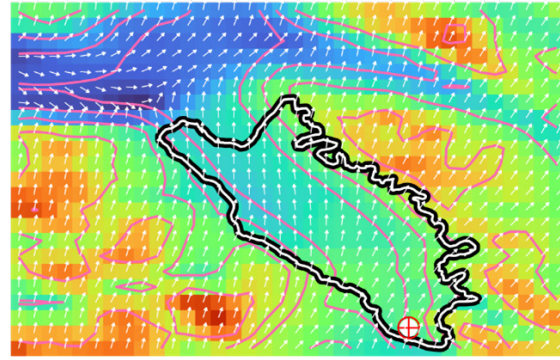


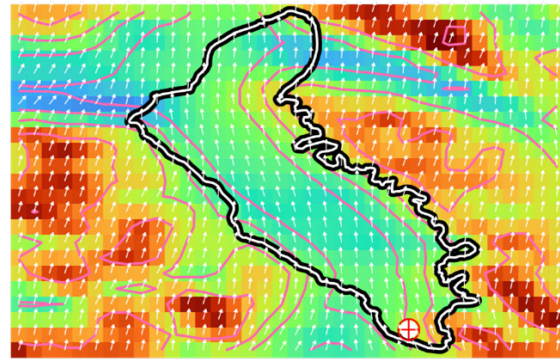
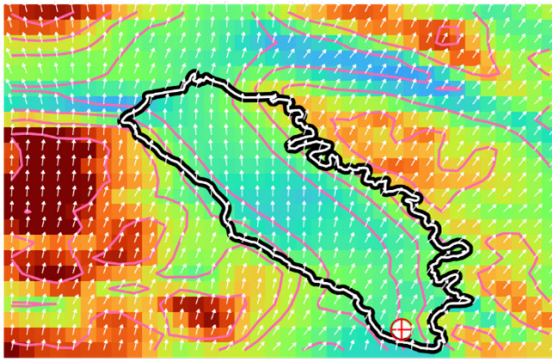
Figure S-7. Vitesse du vent de 10 m et direction du vent modélisées du SHRPD pour la région entourant l'incendie. Les vecteurs du vent pointent dans le sens de la propagation du vent, ce qui correspond à la direction principale de la propagation d'incendie. Les lignes de contour d'altitude sont fournies sous forme de lignes roses, le point d'allumage le plus au sud est indiqué par un croisement rouge et la progression d'incendie estimée est indiquée par le polygone blanc et noir. Les heures sont données en HAR.



juillet 24 1800 hr / hrs après l'allumage: 47



juillet 24 2100 hr / hrs après l'allumage: 50



Vitesse du vent (km/h)

 A horizontal color bar scale for wind speed. It starts with blue at 0, transitions through green and yellow, and ends with red at 30. Numerical markers are placed at 0, 10, 20, and 30.

0 10 20 30

Figure S-7 (suite).

B5. Autres observations de la station météorologique de surface

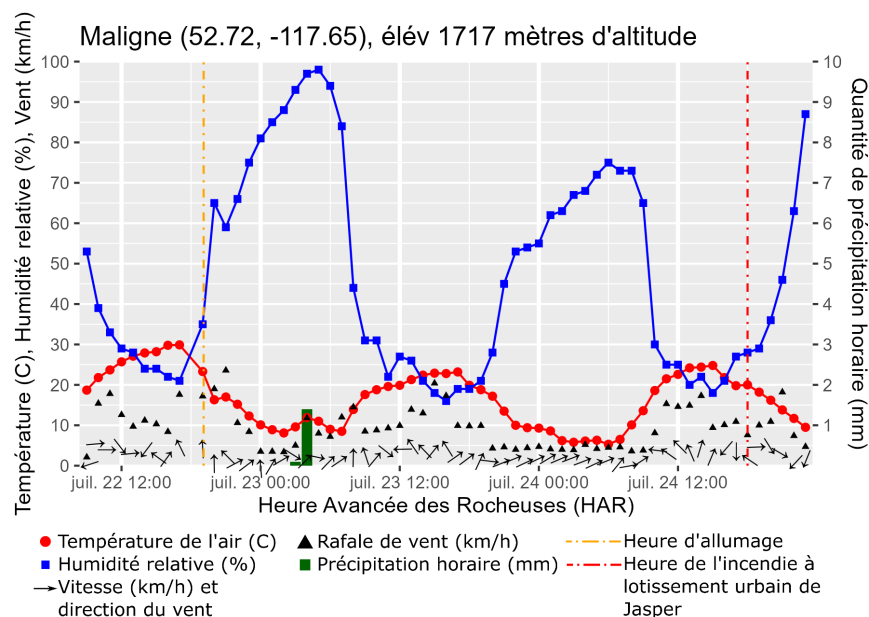


Figure S-8. Observations météorologiques horaires de surface à la station météorologique Maligne (**Figure 1**). Les lignes rouges et bleues indiquent la température et l'humidité relative, respectivement, tandis que les flèches montrent la vitesse du vent et la direction. Les triangles montrent la vitesse maximale de la rafale du vent (basée sur des observations de fréquence de 1 minute). La ligne verticale orange pointillée indique le moment de l'allumage, tandis que la ligne verticale rouge pointillée montre le moment du premier allumage de la structure au lotissement urbain de Jasper.

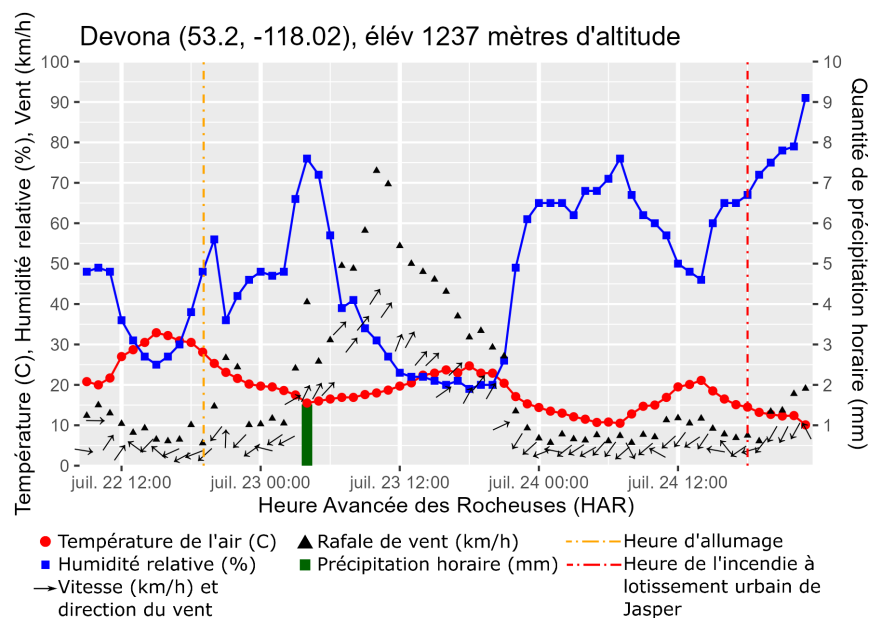


Figure S-9. Observations de surface à la station météorologique du Devona. Voir la **Figure S-8** pour les explications sur les symboles.

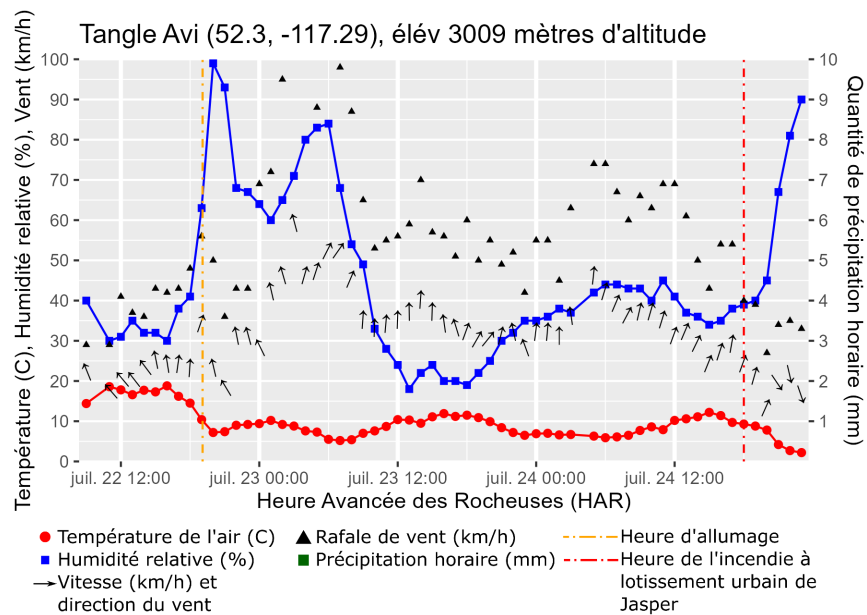


Figure S-10. Observations de surface à la station météorologique Tangle pour les avalanches de crête. Voir la **Figure S-8** pour les explications sur les symboles.

B6. Observation de la terre par satellite du complexe d'incendies de Jasper

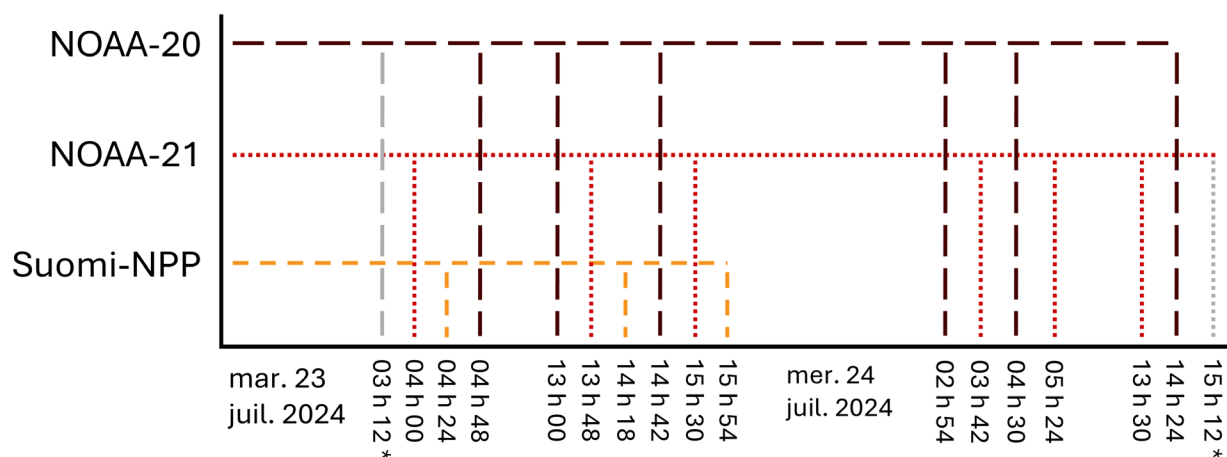
Les satellites d'observation de la Terre (OT) peuvent fournir un enregistrement de données important sur l'activité d'incendies, et les produits de données « points chauds » sont largement utilisés par les organismes de gestion des incendies dans le cadre d'un ensemble d'outils de surveillance des incendies et de connaissance de la situation. Les produits de points chauds sont une source d'information particulièrement précieuse lorsque peu de ressources sont disponibles pour la surveillance terrestre ou aérienne, ou pendant les périodes où la fumée dense immobilise les actifs de reconnaissance aérienne.

Certains des produits de points chauds les plus largement utilisés sont générés à partir des données collectées par l'instrument Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) qui est intégré au satellite joint du Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP) de NOAA/NASA et les satellites NOAA-20, NOAA-21 de la NOAA, ainsi que par l'instrument Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) qui est intégré aux satellites *Aqua* et *Terra* de la NASA. Ces points chauds sont disponibles en ligne en temps quasi réel (dans les 3 heures

ou moins suivant le dépassement par satellite) par des téléspectateurs Web [130] (par exemple, FIRMS de la NASA) et des interfaces d'application qui permettent aux données d'être affichées dans un système d'information de l'utilisateur.

Dans cette annexe, nous reconstruisons l'enregistrement de données sur l'OT fourni par les instruments VIIRS en examinant l'imagerie de niveau-1B et les produits de masque d'incendie dont sont dérivés les produits des points chauds. Spécifiquement, nous utilisons les produits L1 de géolocalisation corrigée par le terrain à résolution d'image aux 6 minutes pour les bandes de 375 m VTP VJ103IMG (NOAA-20), VJ203IMG (NOAA-21), VNP03IMG (SNPP) [131] et les produits L2 d'incendies actifs aux 6 minutes pour les bandes de 375 m VJ114IMG (NOAA-20), VJ214IMG (NOAA-21) et VNP14IMG (SNPP) à 375 m (« masque d'incendie ») [132]. Toutes les données ont été téléchargées à partir des données terrestres de la NASA, ainsi que le Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC), portails en ligne.

Entre l'allumage de l'incendie du Sud (2024-07-22 19 h 5 HAR) et la soirée du 24 juillet (2024-07-24 23 h HAR), la zone d'intérêt de Jasper a été imagée 17 fois par des satellites équipés de VIIRS (**Figure S-11**).



Toutes les observations sont en heure avancée des Rocheuses (non à l'échelle)

* l'imagerie infrarouge indique une activité d'incendie probable, mais aucun point chaud n'est présent.

Figure S-11. Une chronologie de tous les passages VIIRS disponibles du complexe d'incendies de Jasper, répartis par satellite. Les images de NOAA-20 sont indiquées par des lignes verticales en tirets longs rouge foncé, les images de NOAA-21 sont indiquées par des lignes verticales en pointillés rouges, les images de Suomi-NPP sont indiquées par des lignes en tirets orange. Les estampilles temporelles avec des astérisques (*) et les lignes verticales grises correspondantes indiquent des images satellitaires où aucun pixel d'incendie (« points chauds ») n'a été détecté par l'algorithme de détection d'incendie de VIIRS.

Les masques d'incendie générés à partir de ces images satellites (et dont sont dérivés les produits de points chauds largement utilisés) ont identifié une activité incendiaire dans 15 des 17 images. Pour chacune de ces 15 images, nous présentons trois visualisations de la zone d'intérêt (**Figure S-12** à la **Figure S-16**) :

1. un composite en fausses couleurs d'images visibles rouges, infrarouges proches et infrarouges à ondes courtes (montré uniquement pour les scènes diurnes, en raison de l'indisponibilité des données sous-jacentes la nuit);
2. une reclassification des données du masque d'incendie se concentrant uniquement sur les éléments les plus pertinents de la scène (c'est-à-dire incendie, nuage ou fumée, autre, pas de données);
3. Image d'imagerie infrarouge à ondes moyennes (MWIR) de bandes I4 (375 m) de VIIRS provenant du produit Level 1B exprimée en températures de luminosité en unités de kelvin. Les caractéristiques thermiques émettent un signal fort dans le MWIR rendant les incendies hautement visibles à l'œil humain dans une telle imagerie; les données de MWIR sont également centrales à l'algorithme de détection d'incendie¹¹ qui est utilisé pour générer les masques d'incendie. En général, les zones affectées par l'incendie apparaissent beaucoup plus chaudes que les zones environnantes dans le MWIR, cependant, en raison de la conception du capteur VIIRS, une activité d'incendies très intense peut apparaître comme exceptionnellement froide (208 K) dans la bande I4. Le document de description de l'algorithme de détection d'incendie de VIIRS [142] fournit plus de détails sur ce comportement du canal de MWIR I4.

La première observation des incendies South Fire et North Fire par VIIRS après l'allumage du complexe d'incendies de Jasper a été effectuée par NOAA-20 à 3 h 12 HAR le 23 juillet (non affiché). À ce stade, aucune activité d'incendie n'a été détectée, mais un signal de MWIR élevé coïncidant avec le North Fire est visible lors de l'inspection des données manuelles.

La première activité d'incendie détectée par VIIRS était celle du South Fire à 4 h HAR (NOAA-21, **Figure S-12A**); l'incendie North Fire n'était pas détecté à ce moment en raison de l'obscurcissement par les nuages. 24 minutes plus tard (4 h 24 HAR), le North Fire a été détecté par SNPP-VIIRS, mais le South Fire n'a pas été détecté (**Figure S-12B**). Bien qu'aucun nuage ne soit apparent sur le masque d'incendie, la présence de zones

relativement fraîches de l'imagerie de MWIR correspondante sur le lieu de la détection d'incendie dans les lieux précédents suggère qu'une certaine couverture nuageuse a pu entraver la détection ici. À 4 h 48 HAR, une activité d'incendie importante a été détectée par la NOAA-20 aux deux endroits, notamment sur le site de l'incendie South Fire, au sud de la rivière Athabasca (**Figure S-12C**).

La prochaine série de passages de VIIRS a eu lieu dans l'après-midi du 23 juillet; six images ont été collectées en succession rapprochée entre 13 h et 15 h 54 HAR (**Figure S-13** et **Figure S-14**). À ce stade, le South Fire avait considérablement augmenté et se propageait visiblement dans une direction nord-est, au nord de la rivière Athabasca, bien qu'il y ait peu de développement de l'incendie visible pendant cet intervalle de 2 heures. L'examen de l'imagerie composite fausse en couleur montre la présence d'un épais panache de fumée à condensation se propageant vers le nord-est en raison de forts vents du sud-ouest. Bien que l'imagerie de MWIR permette de détecter les incendies à travers une fumée modérément épaisse, ce panache était probablement d'une densité suffisante pour obscurcir partiellement certaines des activités d'incendie se produisant à l'avant de l'incendie, rendant leur détection difficile. En tant que telle, la tête de l'incendie est probablement plus au nord-est à ce stade que les images et les produits d'incendie ici ne le suggèrent.

Tôt le matin (de 2 h 54 à 5 h 24 HAR) du 24 juillet, une croissance sud-est des incendies South Fire et North Fire était apparente, avec une activité incendiaire substantielle se produisant au South Fire sur le côté sud de la rivière Athabasca (**Figure S-15** et **Figure S-16A**). Durant cette période, les produits d'incendie de VIIRS capturent généralement l'étendue du périmètre d'incendie qui est clairement visible dans l'imagerie de MWIR.

Dans le début de l'après-midi (de 13 h 30 à 14 h 24 HAR) VIIRS a passé au-dessus le 24 juillet, aucune activité d'incendie n'a été détectée à l'emplacement du North Fire, et seule une partie du périmètre d'incendie actif pour le South Fire a été détectée par les produits d'incendie de VIIRS (**Figure S-16B** et **Figure S-16C**). Cela était probablement dû en partie à l'augmentation des concentrations de fumée dans la zone générale, et à l'arrivée d'une épaisse banque de nuages au nord-ouest du site (voir la **Figure S-17** pour une vue plus large de la zone et de la banque de nuages montrée dans la **Figure S-16C**). Malgré la capacité limitée des produits d'incendie de VIIRS à détecter l'activité d'incendie à travers

¹¹ Remarque : Tout au long de cette annexe, nous utilisons le terme « détection d'incendie » dans le sens où il est utilisé au sein de la communauté d'observation des incendies sur la Terre, où un pixel est déterminé algorithmiquement comme étant affecté par l'incendie et un point chaud est généré, plutôt que dans l'usage plus courant de la détection au sein de la communauté de gestion des incendies, où « détection » fait référence au premier rapport confirmé d'un incendie de forêt.

la fumée épaisse et les nuages, l'examen de l'imagerie à MWIR offre une bonne connaissance de la situation des zones les plus actives de l'incendie, même sous les nuages (par exemple, image à MWIR dans la **Figure S-13C**).

Une image supplémentaire de la zone a été collectée par

le NOAA-21 du VIIRS à 15 h 12 HAR (non affichée ici). Bien que certains signaux de MWIR élevés aient été observés en coïncidence avec les emplacements des incendies, aucune détection d'incendie n'a été effectuée par l'algorithme de détection d'incendie de VIIRS à ce moment-là, probablement en raison de la présence de nuages épais.

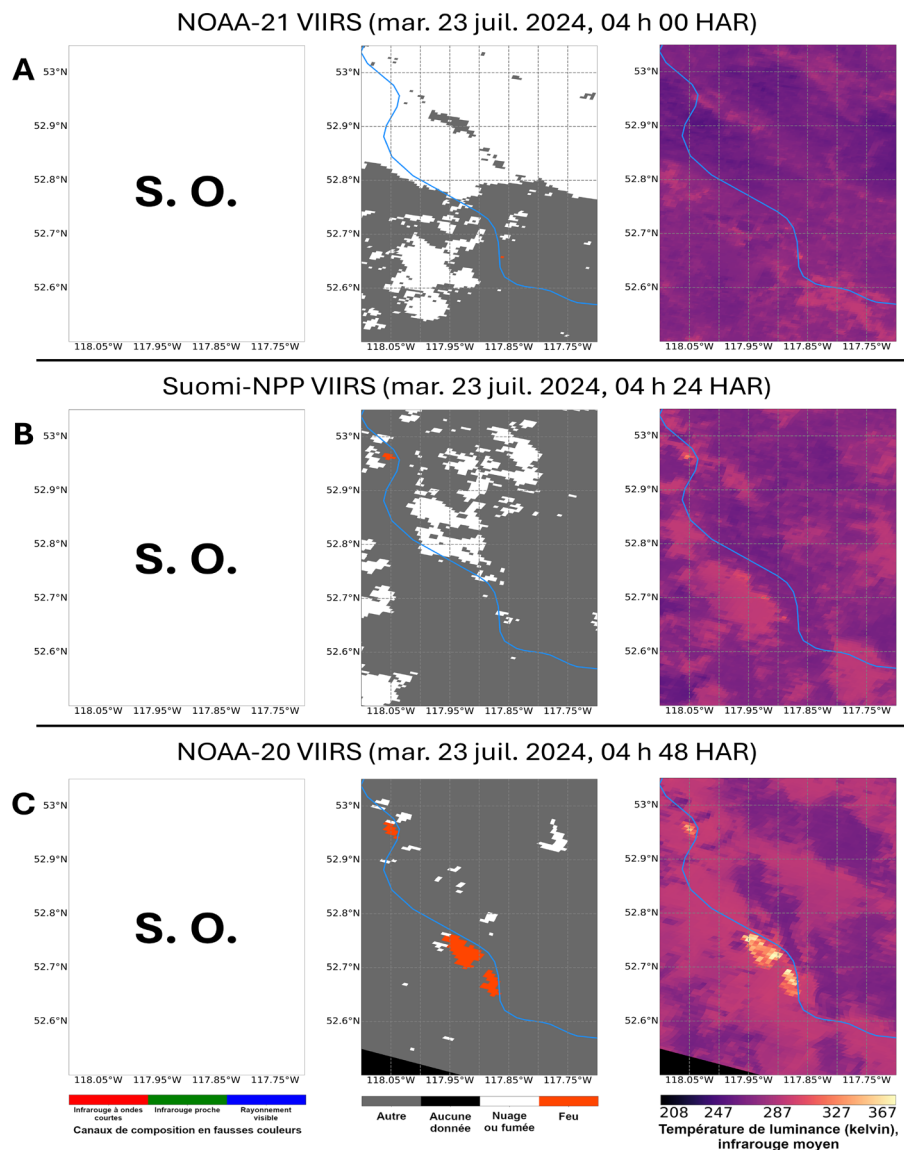
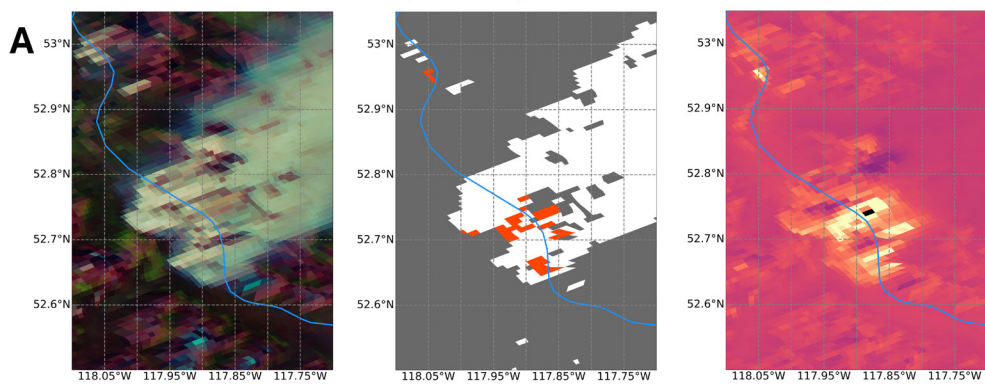
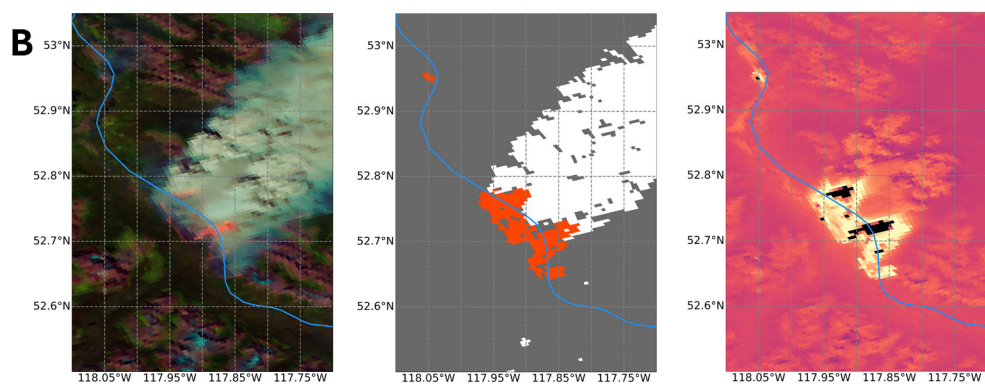


Figure S-12. Images et données dérivées du VIIRS pour le complexe d'incendies de Jasper. Chaque ligne montre des données dérivées d'un seul satellite de contournement comme détaillé dans les sous-titres correspondants. Colonne de gauche : Des composites en fausses couleurs des données des canaux à infrarouge ondes courtes (SWIR), à infrarouge proche (NIR) et visible à longueur d'onde rouge (VIS). Pendant la nuit, ces données ne sont pas disponibles (indiqué par S.O. Colonne du milieu : Une reclassification simplifiée des produits L2 d'incendies actifs aux 6 minutes pour les bandes de 375 m de VIIRS (« masque d'incendie »), reclassifiés pour mettre en évidence les zones d'incendie actif (c'est-à-dire les emplacements où des points chauds sont signalés) et les nuages ou la fumée. Colonne de droite : Données de la bande infrarouge à ondes moyennes (MWIR) de VIIRS Level-1B 14. En général, l'activité incendiaire apparaît dans les images de MWIR comme étant plus chaude (jaunes ou oranges) que les zones environnantes (violet foncé ou roses). Cependant, en raison du comportement spécifique du capteur de VIIRS [132], les zones très intenses de l'activité d'incendie peuvent apparaître comme étant extrêmement froides (208 K). Dans toutes les images, la rivière Athabasca est représentée comme une ligne bleue. Remarque : pour faciliter l'interprétation, toutes les données sont présentées projetées géographiquement en unités de latitude et de longitude. Cependant, en raison du chevauchement géographique entre certains pixels dans les produits de VIIRS, ces rendus ne représenteront pas toujours les produits de données brutes avec toute la précision. Si une exactitude de 100 % est nécessaire, le lecteur doit se référer aux produits de données brutes.

NOAA-20 VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 13 h 00 HAR)



NOAA-21 VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 13 h 48 HAR)



Suomi-NPP VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 14 h 18 HAR)

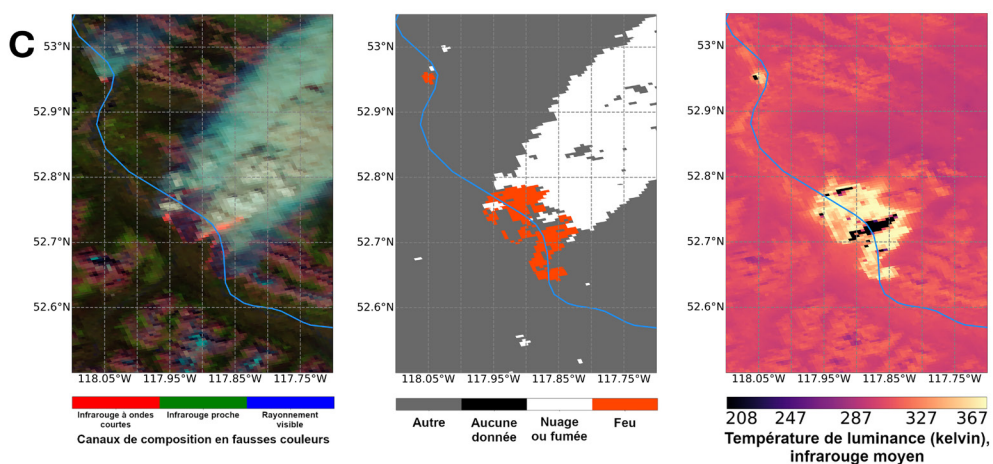
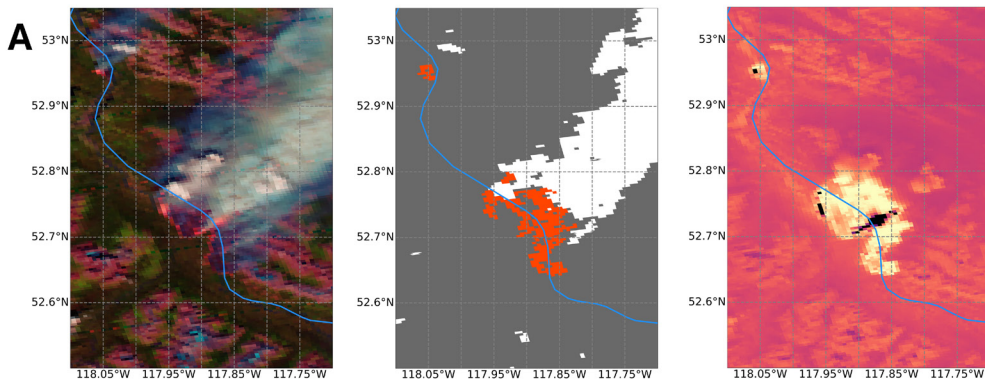
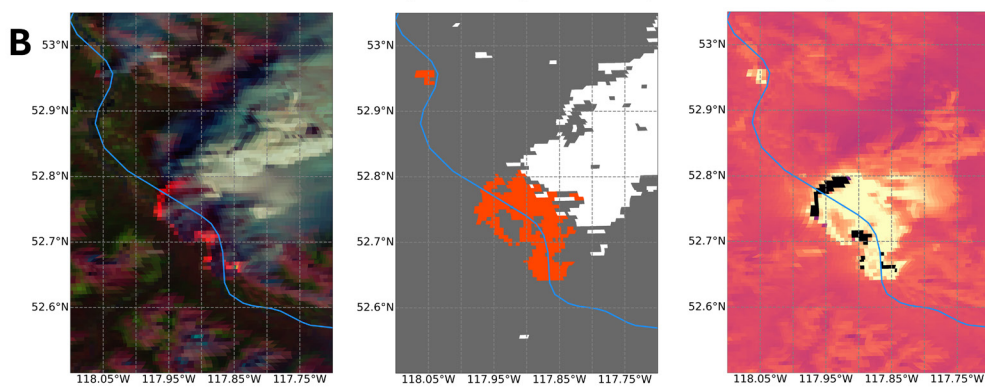


Figure S-13. Images et données dérivées du VIIRS pour le complexe d'incendies de Jasper (suite). Voir la Figure S-12 pour les détails sur l'étiquette.

NOAA-20 VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 14 h 42 HAR)



NOAA-21 VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 15 h 30 HAR)



Suomi-NPP VIIRS (mar. 23 juil. 2024, 15 h 54 HAR)

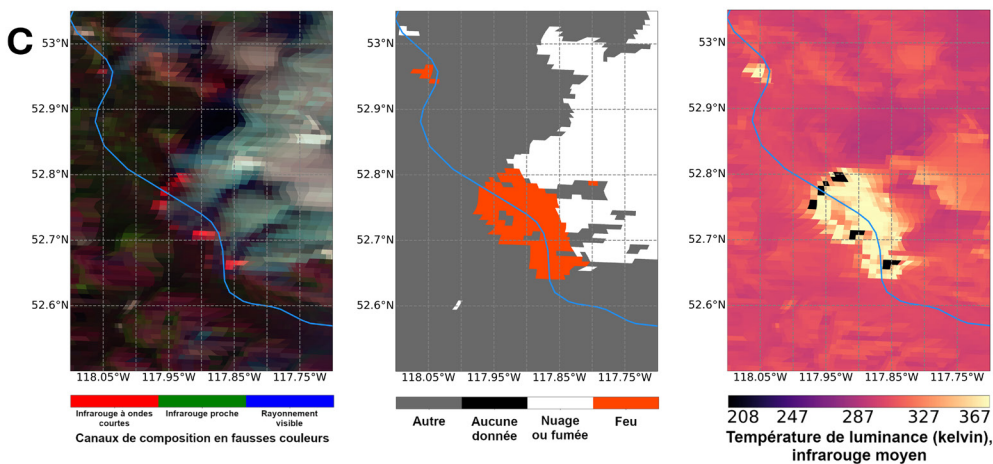
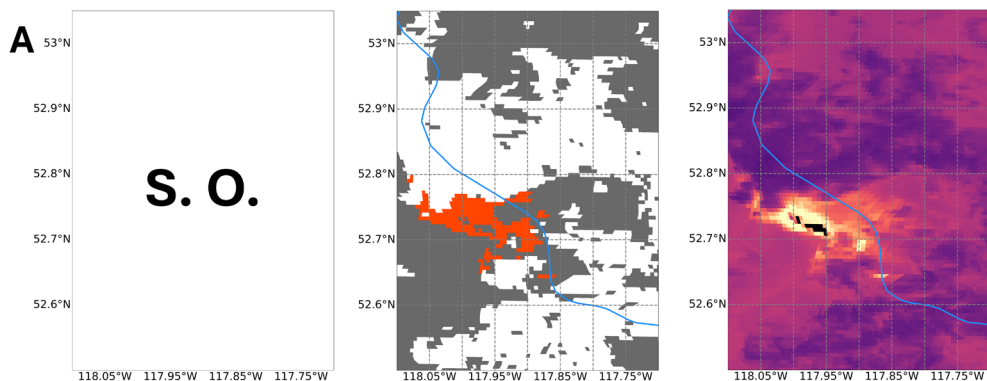
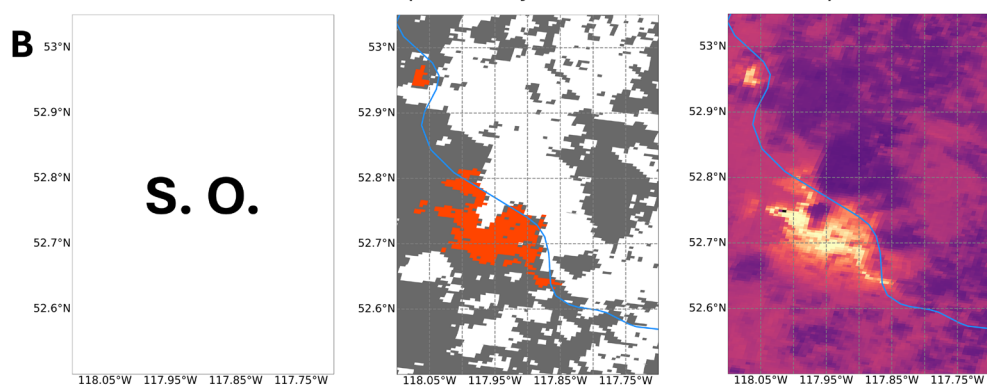


Figure S-14. Images et données dérivées du VIIRS pour le complexe d'incendies de Jasper (suite). Voir la Figure S-12 pour les détails.

NOAA-20 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 02 h 54 HAR)



NOAA-21 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 03 h 42 HAR)



NOAA-20 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 04 h 30 HAR)

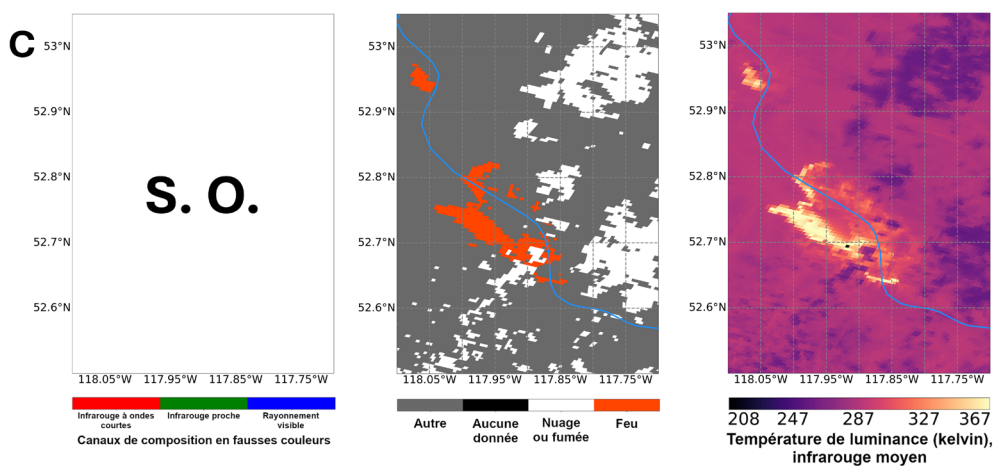
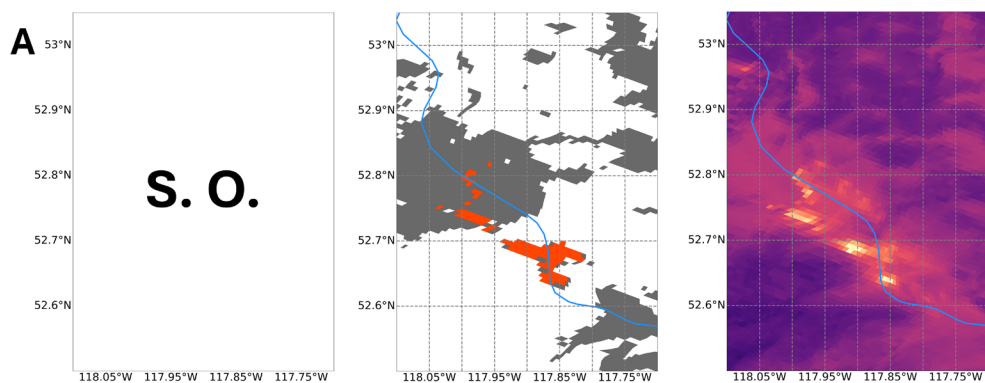
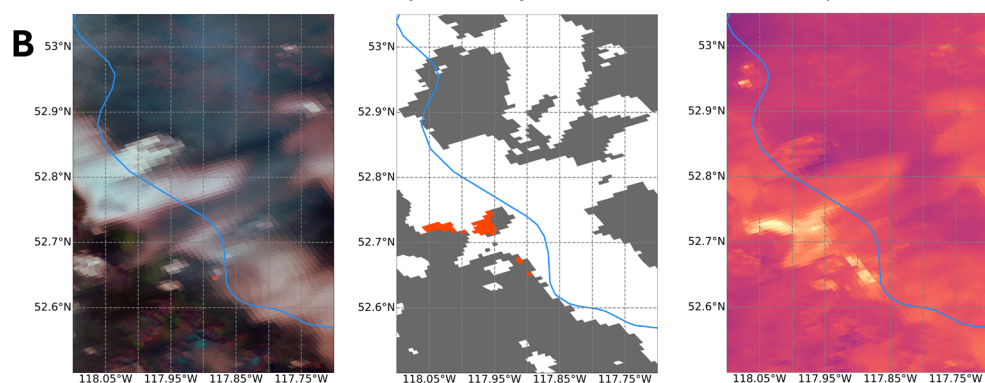


Figure S-15. Images et données dérivées du VIIRS pour le complexe d'incendies de Jasper (suite). Voir la **Figure S-12** pour les détails.

NOAA-21 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 05 h 24 HAR)



NOAA-21 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 13 h 30 HAR)



NOAA-20 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 14 h 24 HAR)

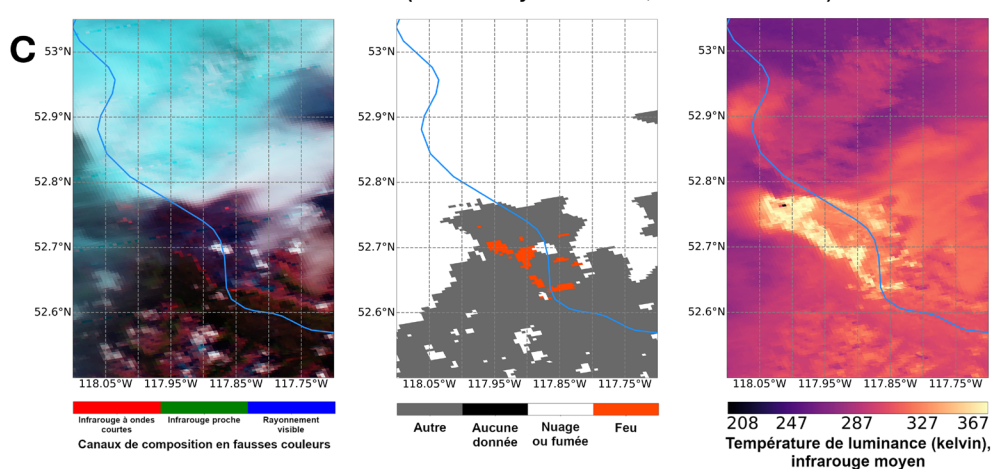


Figure S-16. Images et données dérivées du VIIRS pour le complexe d'incendies de Jasper (suite). Voir la **Figure S-12** pour les détails.

NOAA-20 VIIRS (mer. 24 juil. 2024, 14 h 24 HAR)

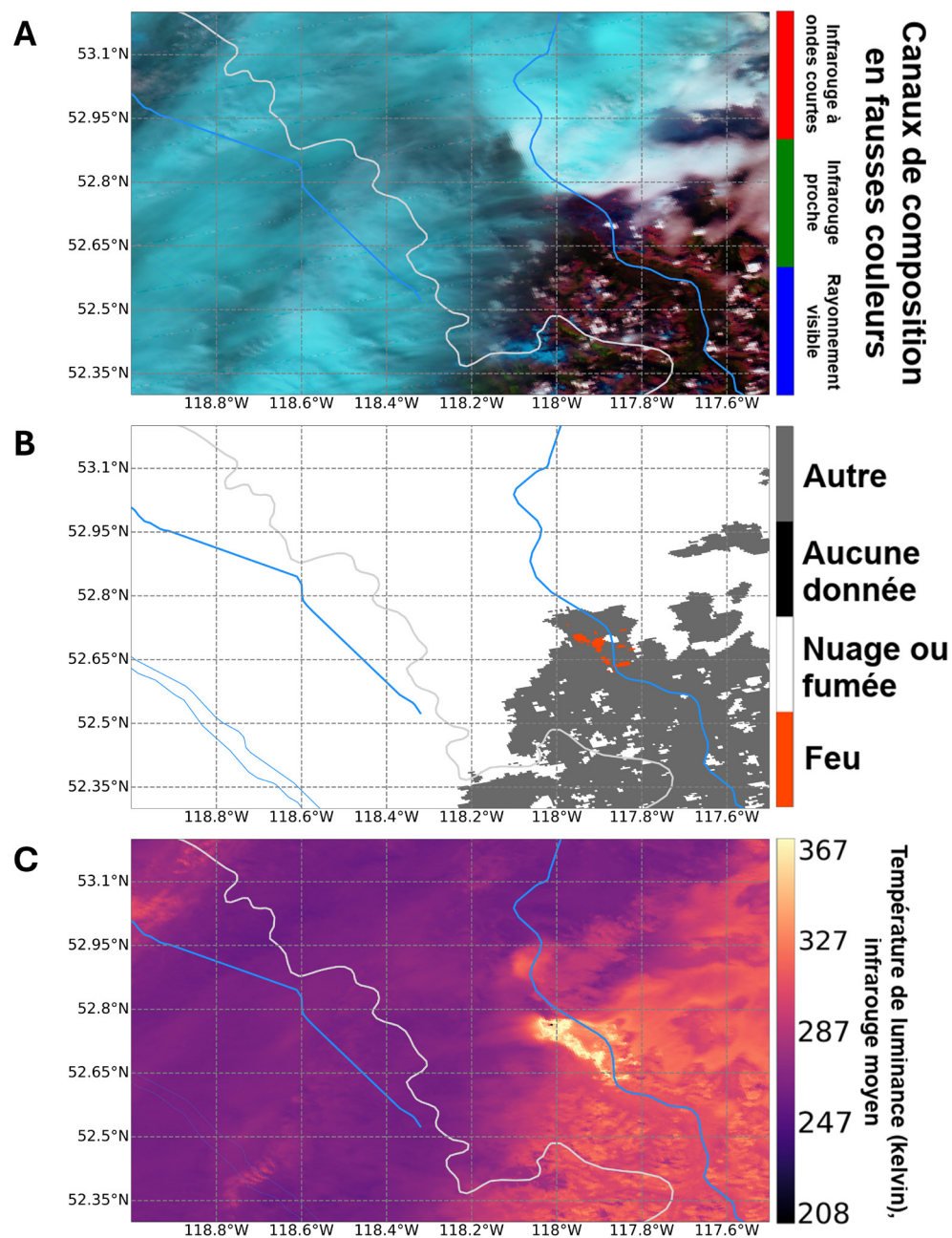


Figure S-17. Une vue large de la zone du complexe d’incendies de Jasper et de l’importante banque de nuages qui s’est déplacée dans la région dans l’après-midi du 24 juillet. Cette figure montre le même passage de NOAA-20 de VIIRS du 24 juillet 2024 à 14 h 24 HAR affichée dans la **Figure S-16C**. Les rivières Athabasca et Fraser sont représentées par des lignes bleues, et la frontière entre l’Alberta et la Colombie-Britannique est indiquée par une ligne gris clair. Voir la **Figure S-12** pour plus de détails.

B7. Carte détaillée des opérations d'allumage

La **Figure S-18** montre l'emplacement approximatif de l'allumage aérienne par le dispositif à sphère plastique monté sur hélicoptère, réalisée dans l'après-midi du

24 juillet. Les lignes d'allumage visaient à créer une convection pour tirer l'incendie vers le haut et loin du site urbain et d'autres valeurs. Les effets d'inflammation sur le comportement du feu et l'efficacité globale des opérations d'allumage pour atteindre les objectifs énoncés ne peuvent pas être déterminés à ce moment.

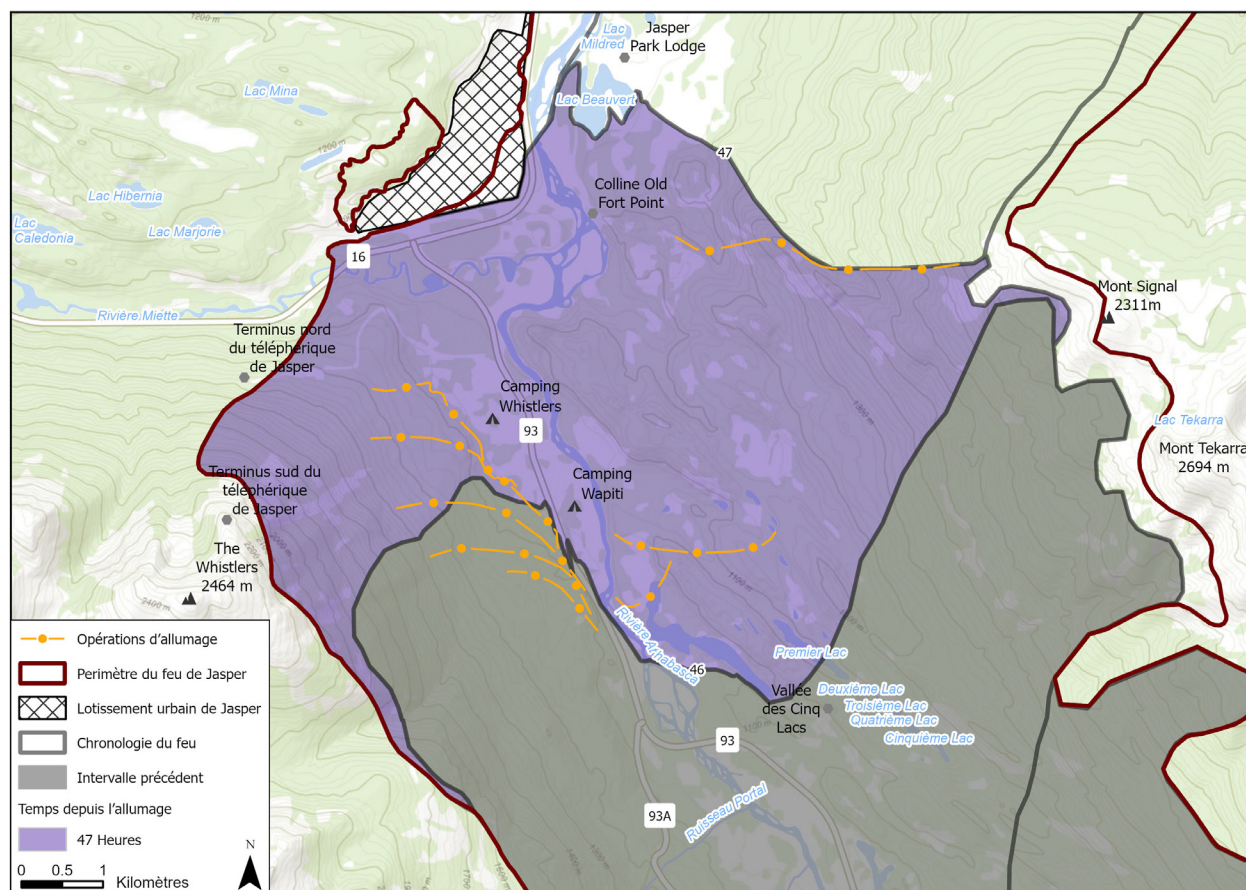


Figure S-18. Lignes d'allumage aériennes réalisées le 24 juillet, de 16 h 42 à 17 h 15. L'emplacement des lignes d'allumage est approximatif, numérisé à partir d'une carte dessinée à la main.

B8. Comportement des incendies de forêt antérieurs dans l'est de la cordillère

Pour mieux comprendre la nouveauté du comportement observé lors de l'incendie South Fire, neuf autres incendies de forêt sont présentés pour comparaison.

Ces incendies se sont produits dans la même région géographique (montagnes Rocheuses, est de la Colombie-Britannique) et la même écozone (cordillère montagnarde) et étaient les plus importants de la région depuis 2003. L'emplacement de ces incendies par rapport à l'incendie de Jasper peut être observé dans la **Figure 19** ci-dessous.

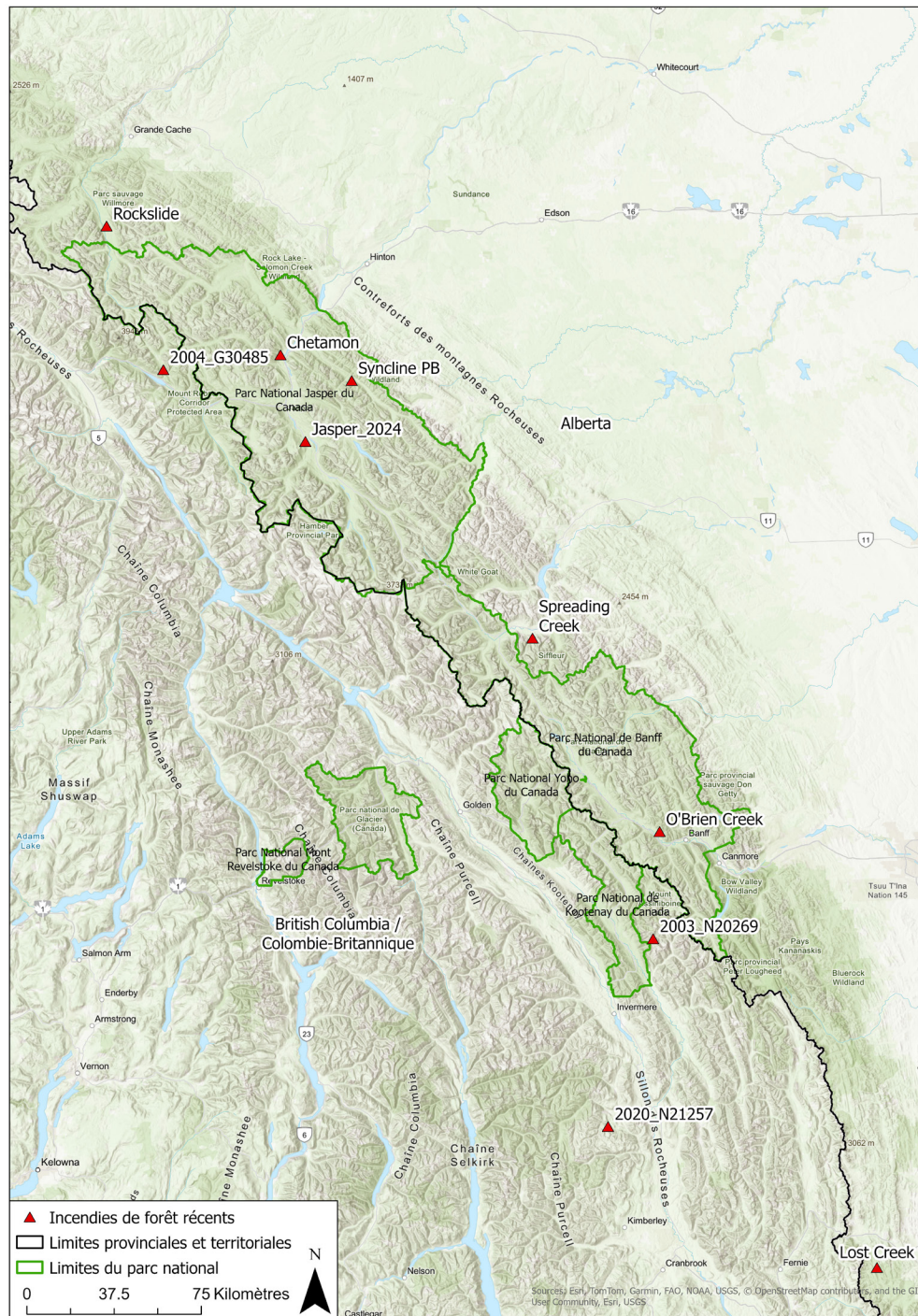


Figure S-19. Emplacements d'autres incendies de forêt historiques dans la même région géographique (montagnes Rocheuses, est de la Colombie-Britannique) et la même écozone (cordillère montagnarde) que le complexe d'incendies de Jasper de 2024.

La comparaison se concentre uniquement sur les trois premiers jours de propagation de chaque incendie, car cette période englobait la grande majorité de la superficie brûlée et des dommages de l'incendie South Fire 2024. La **Figure S-20** montre la zone brûlée pour chaque incendie, avec les lignes de la parcelle colorées en fonction de l'ICD quotidienne de la région où et quand ces incendies ont brûlé. Dans la figure, il est évident que l'incendie de Jasper a pris une ampleur beaucoup plus grande que le reste des incendies, où même dès son premier jour de combustion, il a atteint une taille supérieure à celle de sept des autres incendies après deux jours.

Parmi ces événements, le plus directement comparable au complexe d'incendies de Jasper 2024 est l'incendie de forêt Chetamon de 2022, qui a également brûlé dans la vallée d'Athabasca à l'intérieur de la limite du parc national. L'incendie Chetamon a également été allumé par la foudre et a présenté une période rapide après l'allumage. Il s'est allumé à la fin de l'été pendant une période de faible danger d'incendie, mais a atteint > 6 000 ha au cours de la première semaine après l'allumage. Il est évident que ces deux incendies de forêt se sont produits dans des conditions météorologiques similaires (températures et HR) et avec une teneur en humidité du combustible léger fine; cependant, le South Fire 2024 a brûlé

pendant des conditions de l'ICD presque deux fois plus élevées que celles de Chetamon, et peut-être en conséquence, sa taille était beaucoup plus grande après 48 h. L'occurrence de ces deux incendies met en évidence la susceptibilité de la région aux grands incendies et la propension des incendies à se propager rapidement le long des grandes vallées pendant différentes périodes de la saison des incendies.

Comparé à d'autres incendies dans la région au cours des 25 dernières années, l'incendie de Jasper s'est propagé plus rapidement au cours de chacun de ses trois premiers jours de croissance (y compris depuis l'allumage à 19 h 5 HAR le 22 juillet jusqu'au lendemain matin à 6 h). Seul le feu de Lost Creek dans le sud de l'Alberta près du col Crowsnest a montré des valeurs d'indice du combustible disponible (ICD) similaires et a finalement atteint une taille similaire de 22 000 ha, mais sur une période beaucoup plus longue.

Bien que manquant des contraintes topographiques des montagnes ainsi que des forêts dominées par les pins, le complexe d'incendies de Jasper 2024 a montré une croissance initiale plus comparable à celle des grands incendies dans le nord de l'Alberta. L'incendie de Chisholm du printemps 2001 au sud du lac Slave en Alberta était remarquable pour sa propagation de 35 km

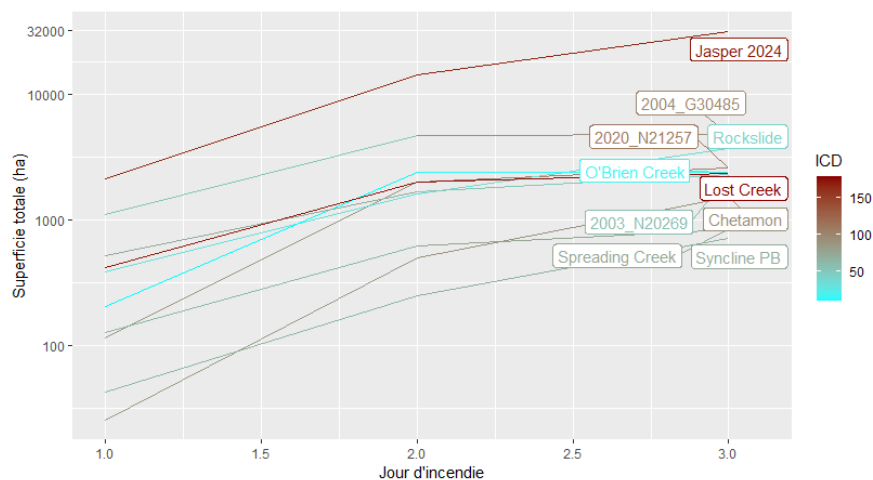


Figure S-20. Superficie totale brûlée pendant les trois premiers jours du complexe d'incendies de Jasper 2024 et de huit autres incendies régionaux similaires. Les couleurs des lignes représentent la meilleure estimation de l'ICD quotidien pour chaque jour d'incendie, où « jour d'incendie » est défini comme commençant à 6 h heure locale, près des conditions d'humidité maximale et d'activité incendiaire minimale. Le premier « jour d'incendie » commence au moment de l'allumage et se termine à 6 h à l'heure locale, peu importe l'heure d'allumage. Notez l'échelle logarithmique pour la surface brûlée.

le septième jour d'incendie sous des vents forts. Mais les trois premiers jours de croissance sur l'incendie de Chisholm ont totalisé 11 000 ha et 20 km de distance totale de propagation d'incendie [133], ce qui est inférieur à la superficie et à la distance de développement de l'incendie observées dans l'incendie South Fire. Le notable incendie de forêt de Horse River en 2016 qui a touché Fort McMurray a atteint 18 000 ha à la fin du troisième jour de combustion, et de même, la majorité des impacts sur les structures se sont produits le troisième jour de combustion. Au quatrième jour de brûlage, des vents forts à 30 à 50 km/h ont permis plus de 40 km de distance de développement de l'incendie, accompagnés d'une activité grave de pyrocumulus [1]. Il n'y avait pas d'observations sur le terrain des schémas de chablis similaires à ceux observés dans le complexe d'incendies de Jasper.

Au-delà des incendies qui se sont produits dans la même région que l'incendie de Jasper de 2024, le taux de croissance le complexe d'incendies de Jasper 2024 a été comparé à deux incendies récents notables dans l'ouest du Canada : les incendies de Lytton Creek de 2021 et de Hay River de 2023. Ces incendies ont été comparés non pas en examinant leur croissance pendant les trois jours initiaux, mais plutôt en comparaison avec leurs trois jours de brûlage actifs.

En comparant l'incendie de Jasper à l'incendie de Lytton Creek de 2021, les trois jours consécutifs les plus actifs de l'incendie de Lytton ont été du 22 au 24 le jour de combustion. Dans cette fenêtre de combustion, l'incendie de Lytton a augmenté de 4 863 ha, 3 414 ha et 5 349 ha, passant de 17 000 ha à presque 31 000 ha. En comparaison, l'incendie de Jasper avait atteint 31 000 ha dans les 48 heures suivant l'allumage. Semblable à l'incendie de Jasper, l'incendie de Lytton a partagé son taux de propagation rapide et sa croissance immédiatement après l'allumage. Au cours du premier jour de combustion, l'incendie de Lytton Creek a atteint une taille d'environ 4 000 ha, similaire à la croissance de l'incendie de Jasper lors de son premier jour de combustion. Contrairement à l'incendie de Lytton, l'incendie South Fire près des chutes Athabasca, qui a brûlé 3 000 ha le premier jour, était le produit de multiples allumages

qui étaient à environ 6 km l'une de l'autre et ont fusionné au cours de la première soirée. Cependant, les deux jours suivants de l'incendie de Lytton ont vu l'incendie augmenter de 1 500 ha, bien moins que ce qui a été observé lors de l'incendie de forêt de Jasper.

Durant l'incendie de la rivière Hay de 2023, les plus grands jours de croissance séquentielle ont eu lieu du 13 au 16 août où l'incendie a connu des jours de croissance de 43 570 ha, 85 920 ha, 7 580 ha et 59 716 ha. Tous sauf un de ces jours de croissance ont brûlé plus que la taille finale de l'incendie de Jasper. Cependant, certaines différences importantes existent qui doivent être prises en compte lors de la comparaison de ces incendies. Les principales différences entre ces incendies sont la disponibilité des combustibles et la contrainte de croissance due aux montagnes Rocheuses, aux rivières et aux systèmes routiers, ainsi que le fait que l'incendie de la rivière Hay a connu de forts événements de vent régional qui ont considérablement aidé à la croissance des incendies, tandis que l'incendie de Jasper était davantage influencé par la sécheresse (ICD) avec des vents beaucoup plus légers.

Lors de l'examen de la croissance relative des incendies par jour, c'est-à-dire, étant donné la taille des incendies à un jour particulier, quel pourcentage de cette taille était le résultat de la croissance pour ce même jour, l'incendie de Jasper a continué à croître à un rythme plus rapide même par rapport à ces autres grands incendies. Cependant, comme la fenêtre de combustion en question pour l'incendie de Jasper était tôt dans la chronologie de la combustion, des pourcentages plus élevés ne sont pas aussi faciles à acquérir que lorsque l'incendie a atteint une grande taille, où même les jours de croissance extrême peuvent ne pas avoir une grande influence en pourcentage. Étant donné ces résultats, la croissance observée lors du complexe d'incendies de Jasper en 2024 peut être considérée comme étant aux limites mêmes des valeurs historiques observées, tant au niveau régional que par rapport à d'autres grands incendies historiques avec de grands jours de croissance.

Tableau S-3. Résumé de la météo, des indices de carburant et du développement des incendies pour l'incendie de Jasper 2024 et neuf autres incendies similaires dans la région.

Nom	Jour d'incendie	Temp (°C)	HR	VV	ICL	IH	IS	ICD	Superficie totale (ha)	Croissance quotidienne (ha)	Taille finale (ha)
Jasper 2024	1	31	22	6	95	135	520	164	2 100	2 100	32 722
	2	23	23	14	95	140	528	168	14 100	12 000	
	3	23,7	33	6	93	144	526	172	31 500	17 400	
Chetamon	1	26,4	24	9,9	93	54	494	85	25	25	6 450
	2	28,8	26	6,2	93	58	501	90	500	475	
	3	26,5	29	4,1	93	61	508	94	1 500	1 000	
2020_N21257	1	25,6	26	11	88	58	434	87	113	113	7 154
	2	25,3	24	13	94	70	479	102	1 982	1 869	
	3	23,5	36	7	92	73	504	110	2 582	712	
Rockslide	1	13,5	20	8	93	28	95	32	379	379	9 885
	2	12	20	8	93	32	99	36	1 613	1 234	
	3	13	20	8	93	38	123	43	3 713	2 478	
Spreading Creek	1	19,5	27	11	91	42	296	62	126	126	8 972
	2	17	46	10	90	53	362	78	612	486	
	3	15,5	43	9	89	52	341	75	835	349	
O'Brien Creek	1	7	27	13	91	10	14	10	204	204	2 381
	2	10	27	13	91	14	20	14	2 381	2 177	
	3	4	27	13	91	18	26	17	2 381	204	
2004_G30485	1	22	32	4	91	32	355	52	1 098	1 098	5 109
	2	23	27	5	93	67	413	93	4 694	3 596	
	3	24,5	57	12	89	71	425	99	4 795	1 198	
2003_N 20269	1	25,7	26	6	83	49	334	72	518	518	2 702
	2	26	22	13	83	33	320	52	1 678	1 159	
	3	26	18	18	94	38	328	59	2 264	1 104	
Lost Creek	1	29,5	23	26	94	121	758	173	417	417	22 000
	2	29,5	40	20	92	125	766	177	1 969	1 551	
	3	27,5	46	15	90	127	773	180	2 339	787	
Syncline PB	1	24,5	14	22	94	54	192	64	42	42	19 806
	2	25,7	19	7	93	60	205	69	246	204	
	3	25	35	13	92	64	208	72	706	502	

B9. Production des tisons et caractéristiques du transport

Le dépôt d'un tison devant le front principal est la principale cause de d'un allumage d'incendie de structure dans les incendies de secteur en milieu périurbain. Bien que les couplés incendie-atmosphère comme FIRETEC puissent simuler le transport des tisons, des données critiques sur la quantité de tisons et la taille des tisons (par exemple, masse, surface et volume) nécessaires pour ces modèles restent manquantes.

Lors d'une reconnaissance initiale des impacts des incendies au Fairmont Jasper Park Lodge (JPL), un grand nombre de tisons ont été observés sur les allées du parcours de golf et dans les fosses de sable, présentant une occasion unique d'échantillonner les tisons générés par les incendies de forêt. À la suite à une évaluation plus approfondie, nous nous sommes concentrés sur l'échantillonnage des tisons dans les fosses à sable, où

elles étaient facilement identifiables. Toutes les particules de tisons ont été collectées dans 30 pièges de sable le long du parcours, et des évaluations de l'impact du complexe d'incendies ont été réalisées dans les peuplements en amont des fosses. La superficie des fosses à sable et leurs distances par rapport à la lisière de la forêt ont été déterminées à l'aide d'images satellites à haute résolution dans ArcGIS Pro.

Les échantillons de tisons collectés ont été séchés au four et triés en quatre types morphologiques principaux : sphéroïdes (cônes), cylindres (branches et rameaux), plaques (flocons d'écorce) et granules (fragments de bois carbonisé), puis subdivisés en classes de diamètre de 2 cm. Chaque échantillon a été photographié, et une analyse d'image a été utilisée pour déterminer le nombre et la surface des particules. Un sous-ensemble de jusqu'à 30 particules de chaque échantillon a été mesuré pour le diamètre et la masse. Au moment de la rédaction, les trois quarts des échantillons ont été traités. Certains résultats intermédiaires sont résumés ci-dessous.

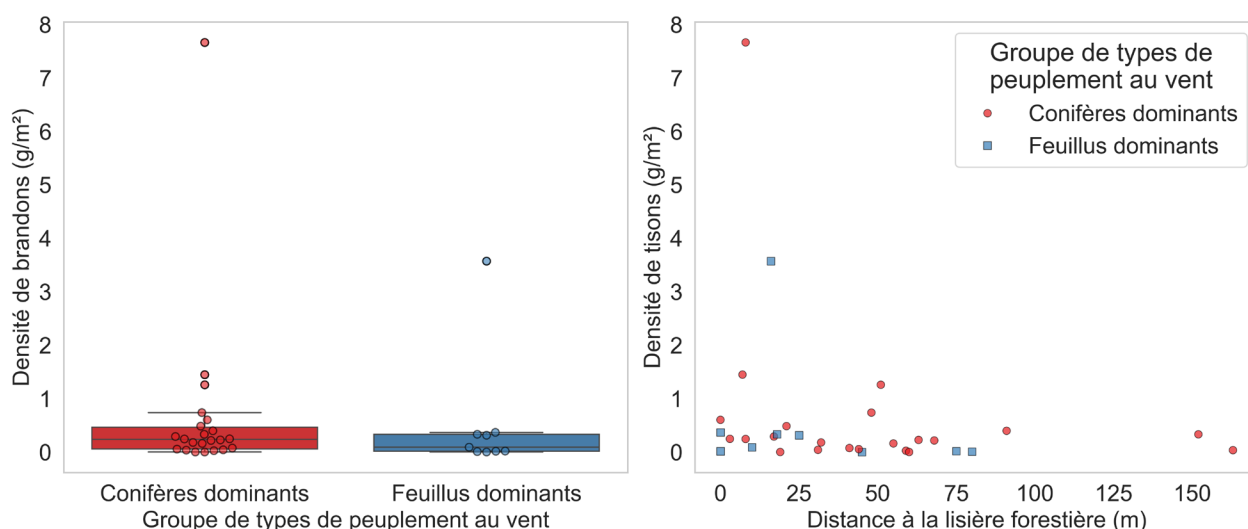


Figure S-21. Observations de tisons sur le complexe d'incendies de Jasper 2024. À gauche, la densité de tisons mesurée en grammes par mètre carré en fonction du type de peuplement en amont de la zone de collecte. Ces données proviennent d'une analyse préliminaire des trois quarts des emplacements échantillonnés près du Jasper Park Lodge. Les peuplements de conifères comprennent des pins tordus, des épinettes ou des peuplements de sapins de Menzies, tandis que les peuplements de feuillus sont principalement de tremble. D'accord, la densité du matériau en fonction de la distance de la lisière forestière. Les mesures de poids en vrac du matériau incluent du matériau partiellement carbonisé.

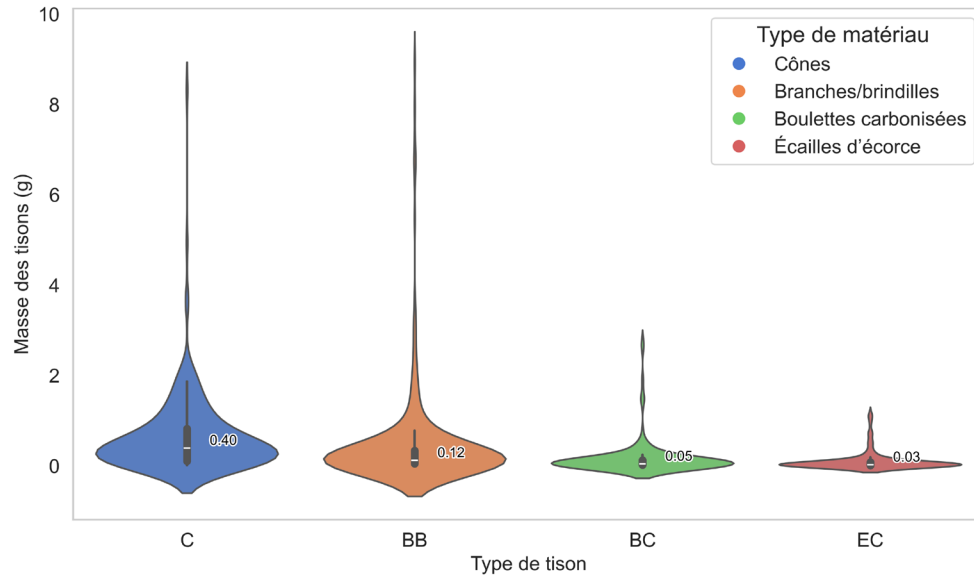


Figure S-22. Distribution de masse par types de tisons sélectionnés, y compris les valeurs médianes, échantillonnées après l'incendie au Jasper Park Lodge. Ces données proviennent d'une analyse préliminaire des trois quarts des emplacements échantillonnés. Les quatre types de tisons les plus échantillonnés sont les cônes (C), les branches et brindilles (BR), les boulettes carbonisées (GC) et les écailles d'écorce (FE).



Figure S-23. Échantillon de branches et rameaux d'un site de tisons avant le traitement et sous-échantillonnage.

B10. Reconstruction des vents extrêmes au sein de la colonne de convection d'incendie

Pour reconstruire les vitesses du vent produites pendant la colonne convective rotative observée dans l'après-midi du 24 juillet, la vitesse du vent minimale requise pour renverser deux contenants en acier observés a été calculée. Ces calculs pour objets rigides de taille régulière sont destinés à compléter d'autres observations de dommages dans les environs, telles que des épinettes à maturité répandues et déracinées, mais autrement non brûlées au terrain de camping Wabasso. Le premier objet d'intérêt est un bac de recyclage au camping Wabasso (**Figure S-24**) qui a été renversé par des vents forts induits devant le front d'incendie. Le schéma du brûlage sur la peinture bleue suggère que le pin a d'abord été renversé par les vents avant le véritable front d'incendie, suivi peu après par un incendie de surface dans l'herbe. S'il est supposé que le bac de recyclage est une simple boîte avec une force suffisante agissant sur le côté du vent transversal pour faire pivoter l'ensemble de la boîte autour du point *P* (**Figure S-25**), nous savons alors que le couple généré par le vent doit dépasser le couple opposé généré par la gravité pour que la boîte bascule. Le couple est calculé en utilisant la composante de la force perpendiculaire au point de rotation, et la distance de cette force au point de rotation.



Figure S-24. La boîte de recyclage renversée devant l'incendie au camping Wabasso

Par exemple (**Figure S-25**), s'il est supposé que la force du vent est uniformément répartie le long de toute le côté gauche de la boîte et que le poids est égal dans toute la boîte, les forces peuvent être simplifiées en une force moyenne passant par le centre de gravité (point du centre rouge). Ainsi, le couple dû au vent et à la gravité (par

rapport au point *P*) est simplement $t_w = 0,5H F_w$ et $t_g = 0,5W F_g$, respectivement, où *H* est la hauteur de la boîte et *W* est la largeur.

$$F_w = C_D A \rho \frac{v^2}{2} \quad \text{Equation 1}$$

$$F_g = mg \quad \text{Equation 2}$$

$$C_D A \rho \frac{v^2}{2} \frac{H}{2} = mg \frac{W}{2} \quad \text{Equation 3}$$

La force du vent (F_w) et la force de la gravité (F_g) peuvent être approximées en utilisant les Équations 1 et 2, où C_D est le coefficient de traînée pour une boîte, *A* est la surface de section transversale de la boîte exposée au vent, ρ est la densité de l'air, *v* est la vitesse du vent inconnue, *m* est la masse de la boîte, et *g* est la constante gravitationnelle. Par conséquent, en revenant à $t_w > t_g$ nous pouvons substituer les équations 1 et 2, et réarranger l'équation 3 pour résoudre la vitesse en utilisant des estimations du coefficient de traînée, des dimensions de la boîte, de la densité de l'air et de la masse de la boîte. En utilisant les valeurs indiquées dans le **Tableau 3**, nous estimons la vitesse du vent nécessaire pour emballer au-dessus de la case illustrée dans la **Figure S-25**, ce qui s'applique à la fois au bac de recyclage et au contenant d'expédition qui a été sorti de la rivière Athabasca.

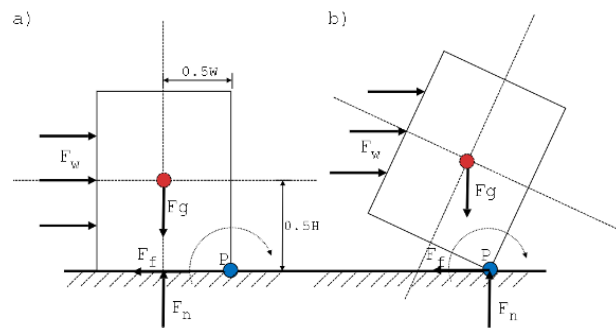


Figure S-25. Diagramme du corps libre d'une case illustrant les forces, *F*, et le point de rotation, *P*. a) avant le basculement et b) pendant le basculement. F_w , F_f , F_n et F_g sont les forces en raison du vent, force de frottement, force normale et force gravitationnelle, respectivement. La force de frottement s'oppose à la force du vent et est la résistance coulissante le long du sol. La force normale est la force du sol s'opposant à la force de la gravité provenant de la masse de la boîte. Ni la force normale ni les forces de frottement ne sont prises en compte dans l'analyse ici, mais elles sont incluses pour l'exhaustivité.

Tableau S-4. Valeurs utilisées pour calculer la vitesse minimale requise pour renverser le conteneur d'expédition et le contenant de recyclage bleu

Conteneur	Coefficient de traînée, C_D	Aire, A	Densité, ρ	Hauteur, H	Masse, M	Gravité, g	Largeur, O	Vitesse minimale, v
Boîte bleue	≈ 1	1 m $\times$ 1,5 M	$\approx 1 \text{ kg m}^{-3}$	1,5 m	200 kg	$9,8 \text{ m s}^{-2}$	1,3 m	48 m s^{-1} (173 km h^{-1})
Conteneur d'expédition	≈ 1	6 m $\times$ 2,6 M	$\approx 1 \text{ kg m}^{-3}$	2,6 m	3 000 kg	$9,8 \text{ m s}^{-2}$	2,4 m	59 m s^{-1} (212 km h^{-1})

Il y a plusieurs mises en garde à considérer. Tout d'abord, les forces de vent nécessaires pour soulever et élever le contenant d'expédition sont supérieures à la force décrite ici et dépassent le cadre de cette simple analyse. Deuxièmement, nous supposons que les contenants sont à la fois lisses et de forme rectangulaire et reposent à plat sur le sol. Troisièmement, l'intensité de rafale, les vents soutenus et la température de l'air (qui affecte la densité de l'air) sont largement inconnus au moment où ces contenants ont été déplacés. En tant que tel, nous faisons des hypothèses sur le coefficient de traînée, ≈ 1 , la densité de l'air $\approx 1 \text{ kg m}^{-3}$, et nous supposons que

la vitesse du vent minimale calculée doit être maintenue pendant au moins plusieurs secondes pour renverser les contenants. Et enfin, le poids du contenant de recyclage n'a pas été mesuré, mais un calcul de la masse (200 kg) a été effectué en utilisant l'épaisseur mesurée de l'acier (1/16 pouce ou 1,59 mm), les dimensions de la boîte (1,5 m $\times$ 1,0 m $\times$ 1,3 m) et l'hypothèse que le cadre intérieur était constitué de tubes en acier carré. Le contenant a été observé comme étant rempli à 25 % de principalement des canettes en aluminium, donc le poids des contenants de boissons eux-mêmes est considéré comme minimal.

B11. Liste des abréviations

Abréviation	Définition et commentaires
AGL	Au-dessus du niveau du sol (élévation, m)
Alb.	Alberta (Canada)
ASL	Au-dessus du niveau de la mer (élévation, m)
BA	Surface terrière (zone transversale des arbres vivants, généralement en m ² /ha)
C.-B.	Colombie-Britannique (Canada)
CCC	Consommation de combustible de canopée (ou cime) (kg/m ²)
CCL	Consommation de combustible ligneux (kg/m ²)
CI	Classe d'intensité
CTC	Consommation totale de combustible (kg/m ²)
DPP	Dendroctone du pin ponderosa
DRATT	Équipe de travail sur la documentation, la reconstruction et l'analyse (auteur collectif de ce rapport)
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ER	Évaluation rapide (parcelles utilisées pour estimer la direction de l'incendie et l'implication de la cime)
É-SB	Forêt d'épinette et de sapin (épinette d'Engelmann – sapin subalpin; Picea engelmannii et Abies lasiocarpa)
FBC	Fraction brûlée des cimes (%)
FFFC	Consommation de combustibles de surface (kg/m ²)
ha	Hectares
HAR	Heure avancée des Rocheuses (fuseau horaire qui contient le parc national de Jasper)
HR	Humidité relative (température)
HRDPS	Système de prédiction déterministe à haute résolution (modèle météorologique)
ICD	Indice du combustible disponible (système d'indice forêt-météo; sans unité)
ICL	Indice du combustible léger (système d'indices météorologiques de chauffage, sans unités)
IEF	Intervalle entre les feux, nombre d'années
IF	Intensité du front (mesure de la puissance de sortie du feu; kW/m)
IFM	Indice forêt-météo (indice sans unité ou système); valeur quotidienne standard ou valeur horaire standard
IH	Indice de l'humus (système d'indice forêt-météo, sans unité)
IPI	Indice de propagation initial (système d'indice forêt-météo, sans unité); valeur quotidienne ou horaire standard
JNP	Parc national Jasper
JPL	Jasper Park Lodge
MCEDIF	Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt
MODIS	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (capteur d'imagerie par satellite)
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration (États-Unis)
PCI	Prévision du comportement des incendies de forêt (système)
RCDF	Réseau canadien de détection de la foudre
SCF	Service canadien des forêts (ministère au sein de Ressources naturelles Canada)
TP	Taux de propagation, m/min
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (capteur d'imagerie par satellite)
VRI	Inventaire des ressources végétales (système de classification des forêts)
WIPS	Renseignements et services de prévision sur les feux de forêt (équipe au sein des SCF)
WUI	Milieu périurbain (région représentant les périphéries d'une collectivité, où les structures résidentielles et les infrastructures rencontrent des complexes de combustible de végétation; également un type d'incendie se produisant dans ces zones)

