

Exposition et adaptation aux incendies forestiers dans la taïga canadienne

Rapport final remis à Ouranos

Le 4 avril 2023

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ce projet est financé par le gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.



Équipe de réalisation :

Dominique Arseneault : Coordination du projet, supervision des reconstitutions historiques et rédaction du rapport;

Marc-André Parisien : Supervision de la modélisation des probabilités d'incendies;

Yan Boulanger : Supervision de la modélisation des probabilités d'incendies et des scénarios climatiques;

Martin Simard : Spécialiste en écologie forestière et géomatique;

Hugo Asselin : Supervision de la question autochtone;

Zahed Shakeri : Étudiant au doctorat sur les reconstitutions historiques;

Guillaume Proulx : Étudiant au doctorat sur la question autochtone;

Suzanne Lavoie : Consultante en paramétrisation et réalisation des simulations.

Ouranos :

David Huard : Supervision du projet pour Ouranos

Isabelle Charron : Supervision du projet pour Ouranos

Pascal Bourgault : Préparation des données de simulation climatiques

Hydro-Québec :

Isabelle Chartier : Supervision du projet pour Hydro-Québec

Frédéric Guay : Géomatique des valeurs à risque

Manitoba Hydro :

Mark Gervais : Supervision du projet pour Manitoba Hydro

Remerciements :

Nous remercions Frédérique Bergeron, Mélodie Côté, Valérie Plante Lévesque, Madeleine Plante, Alexandre Arseneault et Gabriel Leduc pour leur aide sur le terrain. Les contributions de Sandy Erni, Dan Thompson et Denis Dawe du Service canadien des forêts ont été très utiles pour paramétrer les simulations et pour analyser les bassins pyrographiques. Nous remercions les membres du comité de suivi, Samuel Harvey-Lajoie (Trans-Énergie), Guillaume Roy (Hydro-Québec), Patrick Kavanagh (Hydro-Québec) et Yan Boucher (UQAC), de même que Michael Vieira (Manitoba Hydro) pour leur temps et leur enthousiasme. Du côté de la Nation crie, nous remercions Pernilla Talec, Kenneth Tanoush, Howard MacDonald, Victor Blackned, Tyler Coonishish, Katherine Scott, de même que toutes les personnes ayant participé aux entrevues.

Citation suggérée : Arseneault D., Parisien M-A., Boulanger Y., Simard M., Asselin H., Shakeri, Z., Proulx G., Lavoie S. (2023). « Exposition et adaptation aux incendies forestiers dans la taïga canadienne ». Rapport présenté à Ouranos.

Table des matières

1. Introduction.....	2
2. Contexte / objectifs.....	2
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	4
4. Méthodologie / données.....	4
5. Résultats.....	10
6. Analyse et discussion.....	17
7. Conclusion et recommandations.....	19
8. Références.....	20
Annexes.....	23

1. Introduction

La propagation d'incendies dans les environnements aménagés à partir des massifs forestiers environnants est un phénomène de plus en plus préoccupant. Des incendies catastrophiques, causant des pertes de vies et d'infrastructures ont récemment été rapportés dans plusieurs pays, par exemple aux États-Unis, en Europe, en Asie, en Australie, et en Russie (Gill et al. 2013, Calkin et al. 2014). Au Canada, environ 25000 personnes par année sont évacuées en moyenne à cause des feux de forêt, avec une tendance soutenue à la hausse depuis plusieurs décennies (Tepley et al. 2022). Le feu catastrophique de Fort McMurray en Alberta en mai 2016 a entraîné l'évacuation de plus de 80 000 personnes, la destruction de plus de 2000 bâtiments et des dommages estimés à plus de 3,75 milliards de dollars (Johnston et al. 2020). La ville de Slave Lake en Alberta (8000 habitants) a été détruite à 40 % par un feu en 2011. La plupart de ces incendies ont résulté de la combinaison de conditions météorologiques extrêmes, d'accumulations importantes de combustibles et de l'augmentation progressive de la densité des valeurs à risque (ci-après VAR) au travers des massifs forestiers (Gill et al. 2013, Calkin et al. 2014, Johnston et al. 2020).

Au Canada, les feux de végétation sont un facteur de risque particulièrement important dans le nord de la forêt boréale. Certaines régions de la taïga (forêt boréale non commerciale) enregistrent les plus grands feux et les feux les plus fréquents de toute la zone boréale circumpolaire (Boulanger et al. 2012, Erni et al. 2017), avec des taux dépassant 2% du territoire par an, comparativement à des valeurs inférieures à 1% pour la forêt commerciale. Dans la région de Radisson, au cœur du complexe hydroélectrique La Grande, les feux ont été si fréquents depuis le début du XX^e siècle que les sites ont été incendiés en moyenne à tous les 40-50 ans (Héon et al. 2014, Erni et al. 2017). Ces taux de feux élevés sont surtout attribuables aux feux immenses qui surviennent tous les 15-20 ans. En 1922, 1941, 1972, 1989 et 2013, des feux ont croisé le tracé actuel de la route Billy-Diamond sur une distance variant entre 60 km et 125 km (Héon et al. 2014, Erni et al. 2017).

Les communautés et les VAR du Nord du Québec sont donc régulièrement menacées, en particulier les infrastructures stratégiques du complexe hydroélectrique La Grande (centrales de production, postes de transformation, lignes de transport d'énergie, résidences, etc.), qui fournit 40 % de la puissance électrique installée au Québec. De plus, il existe un large consensus scientifique à l'effet que les superficies incendiées vont s'accroître avec le réchauffement climatique (Flannigan et al 2005, Balshi et al. 2009, Boulanger et al, 2014). On s'attend à des sécheresses plus sévères et à des feux plus grands et plus fréquents (Jolly et al. 2015, Wang et al. 2015, 2016, 2017).

2. Objectifs

Les communautés, Hydro-Québec, Manitoba Hydro et les autres entreprises et communautés possédant des VAR dans le nord de la forêt boréale peuvent se protéger en aménageant les combustibles (p. ex couper la forêt autour des infrastructures), mais l'évaluation de la pertinence, de l'efficacité et des impacts économiques et écologiques de ces traitements nécessitent que l'on connaisse d'abord la probabilité que les VAR soient touchées par le feu. Les objectifs généraux de ce projet sont de cartographier la variabilité des probabilités de brûlage sur le territoire du complexe La Grande (Nord du Québec) avec une très haute résolution spatiale pour quantifier l'exposition des infrastructures et communautés. L'expertise développée au Québec a aussi été appliquée au contexte similaire du nord du Manitoba. Les objectifs spécifiques étaient de :

- 1) Documenter la variabilité naturelle de l'activité des feux depuis 200 ans dans l'axe ouest-est du Complexe La Grande pour aider à paramétrer et à valider le modèle de simulation Burn-P3;
- 2) Utiliser Burn-P3 pour cartographier l'exposition aux feux et pour évaluer la probabilité que les VAR importantes soient touchées en situations actuelle (i.e. 2020) et future (2049);
- 3) Produire une analyse détaillée des bassins pyrographiques autour des VAR les plus importantes et les plus exposées. Un bassin pyrographique est défini comme la portion de territoire qui contient tous les points d'allumage des feux qui atteignent un point d'intérêt;
- 4) Évaluer l'exposition au feu des VAR matérielles et immatérielles (sites de ressourcement, d'enseignement, ou à valeur esthétique, etc) de la nation crie dans la région d'étude;
- 5) Transférer l'expertise développée vers le contexte similaire du nord du Manitoba.

La principale région d'étude correspond au Complexe hydroélectrique La Grande et au territoire périphérique entre les degrés de latitude 51° et 55° N, et entre la longitude 70° O et la côte orientale de la baie James dans le Nord du Québec (Figure 1). Ce territoire est principalement peuplé d'environ 11000 Cris répartis entre 5 villages et de 200 Jamésiens (habitant la localité de Radisson) (Statistique Canada 2021). Il comprend onze centrales hydroélectriques et de nombreuses infrastructures associées (lignes à haute tension, routes, aéroports, résidences, etc). La région d'étude secondaire correspond à la partie nord du Manitoba, au nord de 54° N (Figure 1). Ce territoire comprend 9 centrales hydroélectriques reliées par des routes et des lignes à haute tension, 5 villages et de nombreuses infrastructures associées. Ces deux régions appartiennent à la formation géologique du bouclier canadien, et sont caractérisées par une végétation de taïga avec de nombreux lacs. Les taux de feux varient selon les secteurs entre 2.5% et 0.5% du territoire par année (respectivement un intervalle moyen de 40 à 200 ans entre les feux successifs).

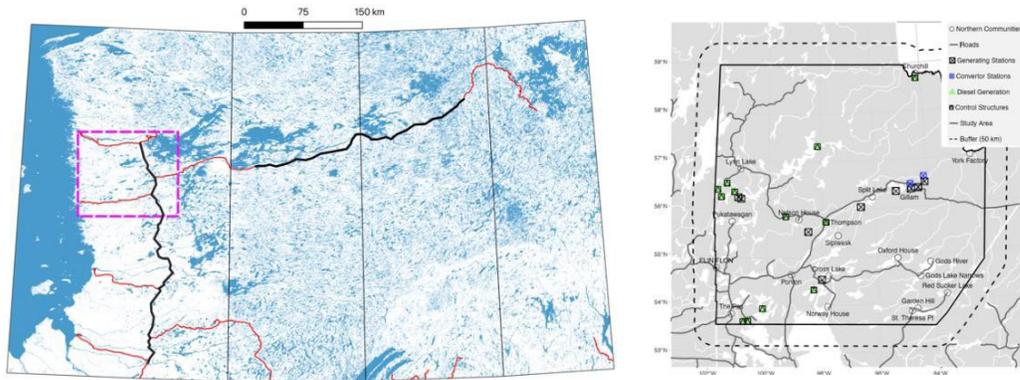


Figure 1 : Zones d'études principale correspondant au territoire du Complexe hydroélectrique La Grande au Québec (à gauche) et zone d'étude secondaire au Manitoba (à droite). Dans la carte du Complexe La Grande, le carré rose correspond au domaine des actifs critiques et les traits noirs épais représentent les transects étudiés en détails le long des routes Billy-Diamond (sud-nord) et Transtaïga (ouest-est). Les routes sont indiquées par les traits rouges. Les traits verticaux noirs séparent les zones climatiques (zones 1 à 4 de l'ouest vers l'est) utilisées dans la paramétrisation des simulations.

3. Cadre théorique

Les phénomènes qui déterminent l'activité des feux de forêts peuvent être séparés en forçages descendants et forçages ascendants. Les forçages descendants regroupent les phénomènes climatiques et météorologiques qui opèrent de manière relativement homogène sur de grands territoires, comme la météo de surface, les patrons de circulation atmosphérique, les modes de variabilité climatiques (p. ex. ENSO, PDO, NAO, etc.) et les tendances climatiques inter-décennales. Ensemble, ces phénomènes déterminent les gradients géographiques et les grandes tendances temporelles d'activité de feux. À l'opposé, les forçages ascendants regroupent les phénomènes, tels que la topographie et l'hydrographie du territoire et l'inflammabilité des différents types de combustibles forestiers, qui créent une résistance plus ou moins grande à l'allumage et la propagation des feux et qui hétérogénéisent spatialement l'activité des feux. Les paysages comprenant des proportions élevées de sites humides, de lacs, de forêts à dominance feuillue ou une proportion élevée de jeunes forêts offrent une plus grande résistance à l'allumage et la propagation des feux que les endroits où ces éléments sont moins abondants (Wallenius et al. 2004, Hély et al. 2010, Héon et al. 2014, Erni et al. 2017).

La progression de nos connaissances sur les forçages de l'activité des feux a entraîné le développement d'approches pour cartographier l'exposition aux feux des infrastructures et des communautés. Des modèles de simulation ont été développés pour intégrer les effets des principaux facteurs ascendants sur les patrons de propagation des feux et sur la probabilité de feux à chaque point des paysages, sous un régime donné de forçages descendants (par exemple le régime climatique des derniers 30 ans) (Finney 2005, Parisien et al. 2005). Cette approche est largement reconnue comme permettant les meilleures descriptions de la variabilité spatiale de l'exposition au feu à travers de grands territoires hétérogènes (Thompson et al. 2011, Miller & Ager 2013, Parisien et al. 2019).

Le modèle de simulation Burn-P3 et son algorithme de propagation des feux, Prometheus, sont les mieux adaptés à la forêt boréale canadienne. Ils permettent d'évaluer la probabilité d'incendie à chaque point (i.e. pixel) d'un paysage en simulant de façon explicite l'allumage et la propagation d'un très grand nombre de feux (Parisien et al. 2005). Le paysage n'évolue pas d'une itération à l'autre, mais le modèle se concentre à répéter des patrons réalistes d'allumages et de propagation des feux pour un état donné du paysage (i.e. les conditions actuelles de combustibles, de topographie et d'hydrographie) et pour le régime climatique considéré. Différents régimes climatiques peuvent être comparés à l'aide de scénarios, en remplaçant les données météorologiques observées par des sorties de simulations climatiques (Wang et al. 2016, Dawe et al. 2022). Le principal produit des simulations est une carte de probabilité d'incendie, calculée à partir du nombre de fois que chaque pixel a brûlé par rapport au nombre total d'itérations. Burn-P3 a permis d'identifier les secteurs à plus grand risque de feux dans des régions de la Colombie-Britannique, de l'Alberta, de l'Ontario et du Québec (Parisien et al. 2007, 2011, Erni et al. 2018, Dawe et al. 2022). Burn-P3 permet aussi d'exporter en format vectoriel les périmètres de chaque feu simulé et d'étudier les points d'allumage et les distances parcourues par les feux avant d'atteindre un point d'intérêt (Parisien et al. 2019, Dawe et al. 2022). Le paramétrage de Burn-P3 requiert une connaissance de la variabilité naturelle de l'activité des feux afin de produire des simulations réalistes pour le territoire et les régimes climatiques d'intérêt.

4. Méthodologie

Variabilité naturelle de l'activité des feux

Même si on possède de bons estimés des taux de brûlage et de la taille des feux pour les derniers 200 ans dans l'axe nord-sud du territoire du Complexe hydroélectrique La Grande (Héon et al. 2014, Erni et al. 2017), le gradient ouest-est n'est pas suffisamment bien documenté. De plus, la relation entre l'âge de la forêt et la probabilité de feux est bien documenté dans l'ouest du territoire mais on ne sait pas si ces données continuent de s'appliquer de la même manière à mesure que l'activité des feux diminue vers l'est. Suivant la méthode précédemment développée pour un transect de 340 km sur la route Billy-Diamond (Héon et al. 2014, Figure 1), 150 cellules contiguës de 2 km x 1 km ont été positionnées dans un SIG, du km 150 jusqu'au km 475 de la route Transtaïga (150 cellules sont nécessaires pour couvrir 325 km de route en raison du tracé sinueux de la route). Les feux enregistrés depuis 1980 suggèrent que ce secteur correspond à un fort gradient d'activité des feux avec des taux de feux passant d'environ 2% par année au km 150 vers des valeurs inférieures à 0,5% au km 475. Sur le terrain, chaque cellule a été parcourue exhaustivement pour localiser les gisements de cicatrices de feux sur les arbres vivants, les chicots et les débris ligneux. Plusieurs cicatrices ont été échantillonnées (section transversale de tronc) dans chaque gisement, de manière à dater par dendrochronologie au moins deux fois chaque feu des derniers 200-300 ans dans chaque cellule. Comme les pins gris s'établissent rapidement et massivement après feu, les dates d'établissement des pins vivants et morts ont aussi été considérées pour dater les feux. De même, au-delà de la limite orientale du pin gris (km 400), nous avons prélevé des sections de tronc le plus près possible du sol sur les épinettes pour dater des feux antécédents au dernier feu. Seuls les sites secs sans mousses ont été considérés pour éviter les longs délais de croissance entre le collet racinaire et le niveau échantillonné. La présence/absence de chaque année de feu dans chaque cellule de 2km² a permis de reconstituer avec une résolution de 2 km le recouvrement linéaire de chaque feu (distance interceptée par le feu le long de la route), de même que les intervalles de temps entre les feux successifs (Figure 2).

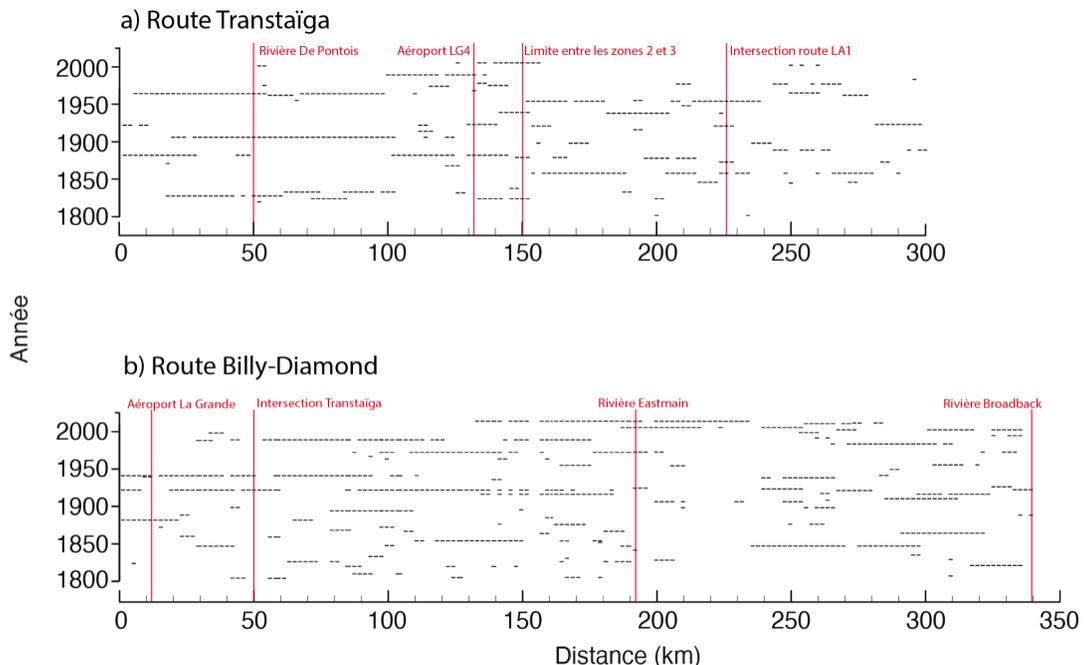


Figure 2 : Reconstitution de l'activité des feux des derniers 200 ans pour les transects de la route Transtaïga (300 km; le présent projet) et de la route Billy-Diamond (340 km; Héon et al. 2014, Erni et al. 2017). Chaque tiret représente un feu détecté dans une cellule de 2 km². Les traits rouges verticaux représentent des points de repères.

Cartographie des probabilités de feux avec Burn-P3

Nous avons cartographié les probabilités d'incendies sur le territoire du Complexe La Grande pour 6 scénarios obtenus en croisant 3 scénarios de combustibles et deux scénarios de climats. Les trois scénarios de combustibles font varier la résistance au feu de la végétation en fonction du temps écoulé depuis le feu précédent. Dans la taïga, les feux sont tellement fréquents que le paysage est une mosaïque de forêts dont l'âge correspond au temps depuis le dernier feu. Les observations faites sur la route Billy-Diamond indiquent que les probabilités de feux sont 4 à 5 fois plus élevées dans les forêts de plus de 50 ans comparativement aux forêts de moins de 20 ans, en raison du temps nécessaire pour le rétablissement après-feu des combustibles. Nous avons donc considéré un scénario qui reproduit ces observations avec une résistance au feu qui diminue progressivement entre 0 et 50 ans après feu (scénario R50). Cependant, certaines études suggèrent que cette résistance pourrait s'atténuer avec des conditions météorologiques plus favorables à la propagation des incendies dans le futur (Parks et al. 2018). Nous avons donc considéré un scénario hypothétique dans lequel la résistance s'atténue en 25 ans (scénario R25). Finalement, pour isoler l'effet des scénarios R25 et R50 dans les simulations, nous avons considéré un scénario de référence dans lequel l'âge de la forêt ne cause aucune résistance à la propagation des feux (scénario R0).

Nous avons implémenté les scénarios R0, R25 et R50 en confectionnant des cartes de combustibles. Toutes les simulations Burn-P3 doivent être basées sur des cartes des combustibles de la méthode PCI (Forêt Canada 1992). Puisque la méthode PCI ne considère pas explicitement l'âge de la forêt, nous avons utilisé la méthode de Erni et al. (2018) qui fait varier la proportion de la composante feuillue dans le type de combustible « M1 » (forêt boréale mixte) pour reproduire l'effet de l'âge de la forêt sur la probabilité de feux. Les forêts de moins de 50 ans (R50) ou de moins de 25 ans (R25) ont été reclassifiées en combustible M1 avec une proportion de la composante feuillue ajustée selon l'âge de la forêt pour imiter la résistance au feu causée par le jeune âge des combustibles. Les forêts qui n'opposent aucune résistance au feu (respectivement toutes les forêts, les forêts de plus de 25 ans ou les forêts de plus de 50 ans dans les scénarios R0, R25 et R50) ont été classifiées en combustible de type C2 (pessière mature). Les tourbières sont aussi des éléments de paysage qui limitent la propagation des incendies (Thompson et al. 2019). De manière similaire à l'âge des forêts, les différents types de tourbières ont été transformées en combustibles PCI en utilisant le scénario « dry » de la méthode de Thompson et al. (2019). Les tourbières ont été ajoutées par-dessus les autres combustibles afin que leur effet soit constant d'un scénario à l'autre. De même, les non-combustibles et les plans d'eau ont été ajoutées en surface des autres combustibles.

Burn-P3 utilise des données météo quotidiennes pour contrôler la propagation des incendies (température, humidité relative, précipitations, vitesse et direction du vent, de même que les indices composant l'indice forêt-météo). Nous avons utilisé l'ensemble de projections climatiques ClimEx (comportant 50 réalisations sur la période 1950-2099; Leduc et al. 2019), pour développer deux scénarios climatiques, représentant respectivement les années 2020 et 2049. Les données ClimEx, générées par le model CanESM2 sous le scénario d'émission RCP 8.5 ont été fournies par Ouranos et préalablement ajustées aux données ERA5 et mise à l'échelle avec les observations instrumentales d'Hydro-Québec pour notre zone d'étude. Les données quotidiennes (13h) ont été extraites à quatre emplacements de l'aire d'étude (intersections de 53.0°N et des longitudes ouest 77.5°, 74.75°, 72.25° et 70°) pour être respectivement assignées à quatre zones climatiques afin de représenter le gradient croissant d'activité des feux de l'ouest vers l'est du territoire (zones 1 à 4 de l'ouest vers l'est). Les scénarios 2020 et 2049 ont respectivement été composés en combinant les données quotidiennes provenant des 50 réalisations ClimEx pour les années 2020 et 2049.

Toutes les simulations ont été produites en considérant une taille de feu minimale de 200 ha et des pixels de 250 m x 250 m (6,25 ha). Burn-P3 a été calibré en produisant des groupes de 1000 itérations avec le combustible R50 et les données ClimEx de la période 1990-2020. Pour chaque groupe, le réalisme des simulations a été évalué en comparant les distributions de fréquences de la taille des feux simulés aux valeurs observées dans la région d'étude entre 1961 et 2018. On a ajusté les simulations en modifiant la distribution de fréquence du nombre de jours de propagation des feux (journées avec un indice forêt-météo > 19) tant que des écarts importants (> 10% de différence de la taille moyenne) persistaient entre les données observées et simulées. Les distributions finales des jours de propagation pour 2020 et 2049 ont été ajustées selon la méthode de Wang et al. (2014, 2017).

Le nombre de feux par itération a été paramétré à partir de la distribution de fréquence du nombre de feux de plus de 200 ha observé par année dans la zone d'étude entre 1980 et 2019. Afin d'obtenir des emplacements d'allumages identiques pour tous les scénarios, les emplacements aléatoires obtenus après 10000 itérations du scénario R50 avec le climat 2020 ont été répétés dans les cinq autres scénarios. Les allumages et la météo ont été séparés entre le printemps (1^{er} mai au 15 juin) et l'été (16 juin au 31 août) afin de considérer l'évolution saisonnière des combustibles suite au développement des feuilles. Pour chaque scénario, une carte de probabilité de feu a été obtenue en divisant le nombre de feux simulés dans chaque pixel par le nombre d'itérations (10000) et en multipliant le résultat par 100 pour obtenir une valeur exprimée en pourcentage. Les cartes de probabilité de feux correspondant aux 6 scénarios de combustibles et de climats ont été produites en combinant les feux simulés dans chaque zone et pour chaque saison. Les détails techniques de la préparation des simulations sont présentés à l'annexe A.

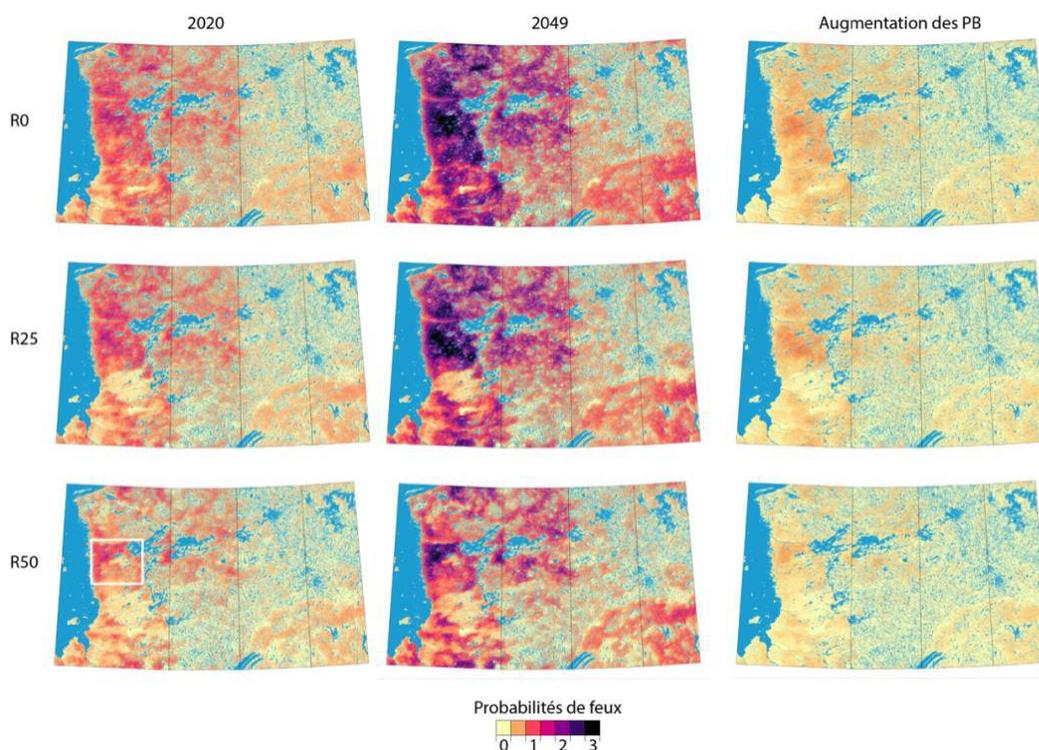


Figure 3 : Cartographie des probabilités de feux dans la zone d'étude principale du Complexe La Grande pour les 3 scénarios de combustibles (R0, R25, R50) et les deux scénarios de climats (2020, 2049). La colonne de droite, qui représente l'effet du changement climatique entre 2020 et 2050, a été obtenue par soustraction des valeurs de probabilité de chaque pixel entre les cartes 2049 et 2020 pour chaque scénario de combustible. Le carré délimité par un trait blanc dans la carte R50_2020 indique le domaine des actifs critiques.

Le domaine des actifs critiques

En comparant les cartes de probabilités en sortie de Burn-P3 (Figure 3) avec la position des infrastructures dans la zone d'étude, Hydro-Québec a identifié un secteur où plusieurs infrastructures et communautés importantes sont exposées à de fortes probabilités de feux. Ce secteur, approximativement situé entre les latitudes 52.8°N et 53.8°N, à l'ouest de 77°O, est identifié ci-après comme le « domaine des actifs critiques » (Figures 3 et 4). Nous avons effectué une analyse détaillée de l'exposition au feu des VAR dans le domaine des actifs critiques, en traitant séparément les actifs de nature ponctuelle (villages, bâtiments, aéroports, postes de transformation, antennes de télécommunication), les lignes de transport d'énergie et les routes. Pour chacun des 6 scénarios de simulation, tous les polygones de feux simulés qui touchaient le domaine des actifs critiques ont été extraits et utilisés dans les analyses subséquentes. Étant donné que les simulations Burn-P3 ont une résolution spatiale de 250m x 250m, certains actifs (Chisasibi, DESAULN/T-SA1, Centrale_La_Grande-1, Poste_Desaulniers) correspondent à des pixels de non-combustibles qui, par définition, ne peuvent être brûlés par aucun feu. Afin d'atténuer cette situation extrême, les actifs critiques ont été regroupés (ci-après les groupes d'actifs critiques; GAC) en des polygones digitalisés auxquels une zone tampon de 250 mètres a été ajoutée. Nous avons formé 17 groupes contenant entre 1 à 6 actifs critiques (Figure 4).

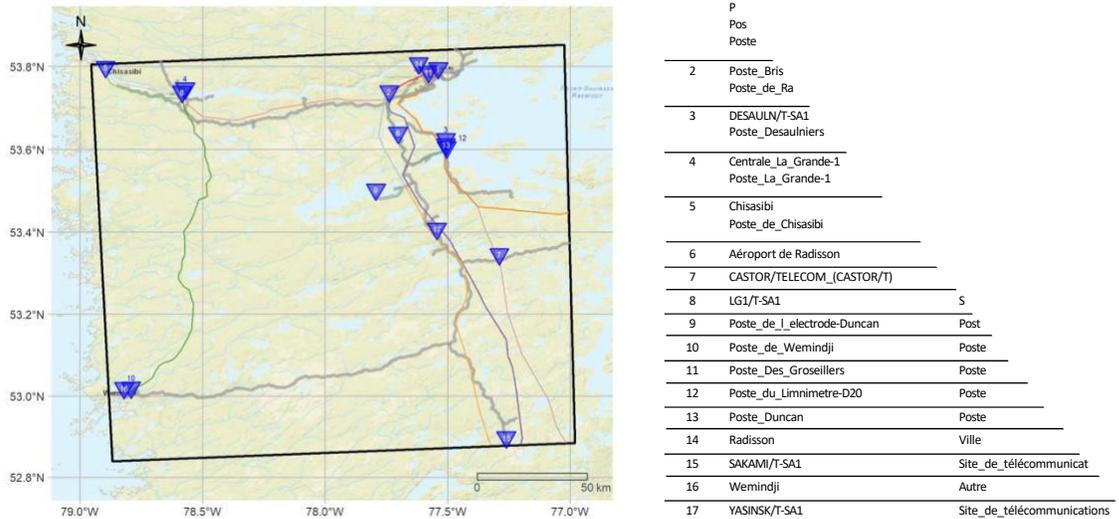


Figure 4: Domaine des actifs critiques dans le territoire de Complexe La grande (à gauche). Les traits gris épais et les traits colorés étroits représentent respectivement les routes et les lignes de transport d'énergie. Plusieurs actifs ponctuels ont été regroupés (à droite) pour contourner un artéfact géomatique lors de leur intersection avec les polygones de feux simulés.

Nous avons calculé le pourcentage du nombre de feux atteignant chaque GAC par rapport au nombre total de feux présents dans le domaine des actifs critiques. Nous avons calculé la superficie de chaque feu atteignant un GAC, de même que la distance entre son point d'allumage et le GAC correspondant. Nous avons cartographié le bassin pyrographique de chaque GAC, c'est-à-dire l'enveloppe convexe de tous les points d'allumages des incendies touchant le GAC (Dawe et al. 2022). Pour chaque pixel du bassin pyrographique de chaque GAC, nous avons calculé le ratio de brûlage du bassin pyrographique (RBBP), c'est-à-dire le nombre de fois que le pixel a été brûlé par les feux qui atteignent le GAC par rapport au nombre de fois que le pixel a brûlé par l'ensemble des feux du domaine d'actifs critiques (Scott et al. 2012, Thompson et al. 2013). Dans le cas des actifs linéaires (lignes et routes), on a aussi calculé le nombre de kilomètres interceptés par chaque feu, en combinant l'ensemble des routes et des lignes, ou en considérant les lignes individuelles du CIRCUI1. Les détails techniques et les résultats détaillés de cette analyse sont présentés à l'annexe B. Les résultats ont été combinés dans des fichiers html pour être consultées de manière interactive.

Exposition des valeurs à risque de la nation crie dans la région d'étude La Grande

Nous avons identifié les valeurs à risque matérielles et immatérielles crie, mal connues, à l'aide d'entretiens avec des experts du territoire. Cette étape a nécessité d'obtenir l'accord des conseils de bande et d'obtenir une certification éthique pour le projet. Les conseils de bande de Nemaska et de Wemindji ont donné leur accord pour participer à cette étape. Les entretiens ont été réalisés durant l'été 2022 auprès de 23 utilisateurs du territoire et maîtres de trappe (Tallymen) des deux communautés. Les entretiens semi-dirigés ont porté sur les expériences passées d'épisodes d'incendies, les savoirs écologiques liés aux feux et la perception des répondants quant à la gestion actuelle des incendies forestiers. Une analyse thématique de ces entretiens a été effectuée à l'aide du logiciel NVivo pour identifier un ensemble de valeurs décrites dans les récits, les services écosystémiques et culturels rendus par les incendies, ainsi que les inquiétudes face à l'avenir. Les résultats préliminaires montrent que le passage d'un mode de vie basé sur la trappe, la chasse, la pêche et la cueillette vers une vie plus sédentaire a exposé de nouvelles infrastructures crie au feu. Des pratiques traditionnelles d'aménagement de la forêt sont mobilisées pour protéger certains lieux, mais les très grands feux, comme celui de la rivière Eastman en 2013, sont une source d'inquiétude importante puisqu'il s'agit d'un phénomène rare aux conséquences graves. L'effet cumulatif de l'industrialisation de la région et des changements climatiques transforme les activités des utilisateurs du territoire en raréfiant ou en déplaçant certaines espèces animales ou végétales culturellement importantes. Des ateliers de cartographie participative (prévus à l'hiver 2023) permettront aux utilisateurs du territoire des communautés participantes de spatialiser eux-mêmes les VAR traditionnelles et de proposer des méthodes spécifiques de gestion du risque de feu. Ces VAR seront numérisées dans un SIG et leur exposition aux feux sera quantifiée en adaptant la procédure utilisée pour le domaine des actifs critiques.

Manitoba

Nous avons utilisé Burn-P3 pour cartographier les probabilités de feux dans le territoire du Manitoba situé au nord de 54°N, où Manitoba Hydro possède plusieurs infrastructures de production hydroélectrique. Un seul scénario correspondant à la situation actuelle a été paramétré. Les combustibles étaient représentés par la carte de combustible du Système PCI du Service canadien des forêts (version du 14 novembre 2019). Les données météo ont été extraites à partir des observations instrumentales du réseau de stations d'Environnement et Changement climatique Canada pour six zones d'incendies basées sur la classification de Erni et al. (2020). Les données instrumentales ont été homogénéisées spatialement entre les zones grâce aux fonctions d'interpolation du programme Biosim v11 (Régnière et Saint-Amant 2014). Lors de la calibration, le réalisme des simulations a été évalué en comparant la distribution de fréquences de la taille des feux aux valeurs observées dans la région d'étude entre 1980-2019. On a ajusté les simulations en modifiant la distribution de fréquence du nombre de jours de propagation des feux (journées avec un indice forêt-météo > 19) tant que des écarts importants (> 25% de différence dans la taille moyenne) persistaient entre les données observées et simulées. La compilation des probabilités d'incendies dans chaque pixel de la carte a été basée sur 20000 itérations avec des pixels de 250m x 250m et une superficie minimale des feux de 200 ha. Les détails techniques de la préparation des simulations sont présentés à l'annexe C.

5. Résultats

Variabilité naturelle

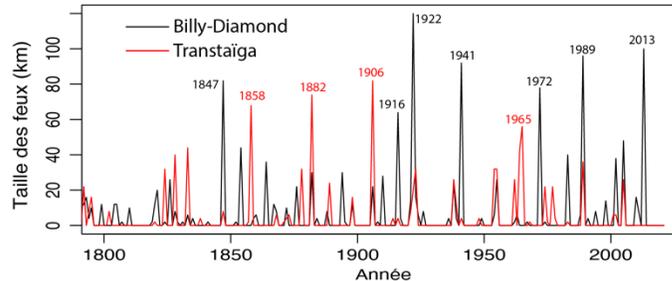


Figure 5 : Nombre de km interceptés par les feux sur les routes Billy-Diamond et Transtaïga depuis le début du XIX^e siècle.

Les données historiques sur l'activité des feux sur le transect de 300 km de la route Transtaïga ont été comparées aux données similaires déjà récoltées au nord de la rivière Broadback sur la route Billy-Diamond (Figures 2, 5 et Tableau 1). De manière générale, le territoire du complexe La Grande se caractérise par une activité de feux très importante, avec 20 à 36 années différentes de feux depuis 1840 selon les secteurs. Des feux d'au moins 50 km de long sont survenus régulièrement depuis au moins 150 ans (Figure 5). Les taux de feux moyens ont varié autour de respectivement 2% et 1,5% du territoire par année dans les secteurs Billy-Diamond et de la Transtaïga. Le secteur nord-ouest de la région d'étude a connu les feux les plus grands avec des tailles de 90-120 km dans le nord du secteur Billy-Diamond et dans l'ouest du secteur Transtaïga (Figure 2). Le secteur Transtaïga s'est caractérisé par une diminution progressive de la taille des feux et des taux de feux de l'ouest vers l'est alors que ces paramètres ont été plus constant entre le nord et le sud du secteur Billy-Diamond. La dernière section de la Transtaïga (à l'est de l'intersection de la route de la centrale LA1) s'est caractérisée par une plus faible activité de feux qu'ailleurs, avec 14 années de feux et un taux de feux de 1,2% du territoire par année depuis 1840. Les taux de feux sont fortement dépendants du temps écoulé depuis le feu précédent, avec des valeurs 4 à 5 fois plus élevés dans les forêts de plus de 50 ans comparativement aux forêts de moins de 20 ans, mais cette tendance est atténuée dans la zone 3 où les taux de feux sont plus faibles (Figure 6). Ce phénomène de dépendance crée une résistance qui réduit l'activité des feux. En même temps, il permet de prévoir que les prochains feux sont plus susceptibles de se produire dans les grands massifs de forêts matures.

Tableau 1 : Paramètres d'activité des feux au cours de la période 1840-2021 dans les secteurs inventoriés de la route Billy-Diamond et de la route Transtaïga. Les zones 1, 2, 3 réfèrent aux zones de paramétrisation des simulations (voir la Figure 1).

	Route Billy-Diamond		Route Transtaïga	
	Zone 1 Nord	Zone 1 Sud	Zone 2	Zone 3
Longueur totale inventorié (km)	210	130	150	150
Longueur totale brûlée depuis 1840 (km)	790	460	382	358
Ratio Longueur brûlée / Longueur inventoriée	3,8	3,5	2,5	2,4
Nbr d'années de feux	36	28	20	22
Feu le plus long (km; Année)	118; 1922	60; 1847	88; 1906	78; 1858
Taux de feux (% du territoire par année)	2,1	1,9	1,4	1,3
Intervalle moyen entre les feux successifs (Années)	48	53	71	77

À cet effet, le secteur de la route Billy-Diamond est actuellement dominé par des forêts plus jeunes que l'intervalle de temps moyen entre les feux survenus depuis 1840, suggérant que les combustibles ne se sont pas complètement rétablis sauf pour l'extrémité nord (secteur de l'aéroport La Grande), qui n'a pas subi de feu pour une période anormalement longue (Figure 2). En revanche, les forêts de la Transtaïga sont actuellement au moins aussi vieilles que l'intervalle de temps moyen entre les feux des deux derniers siècles, suggérant que les combustibles sont relativement bien développés, sauf pour la région de LG4 incendiée en 1989 et en 2005. On ne décèle encore aucune tendance claire d'augmentation de l'activité des feux en réponse au réchauffement climatique, malgré la très forte activité des feux dans le territoire (Figure 5).

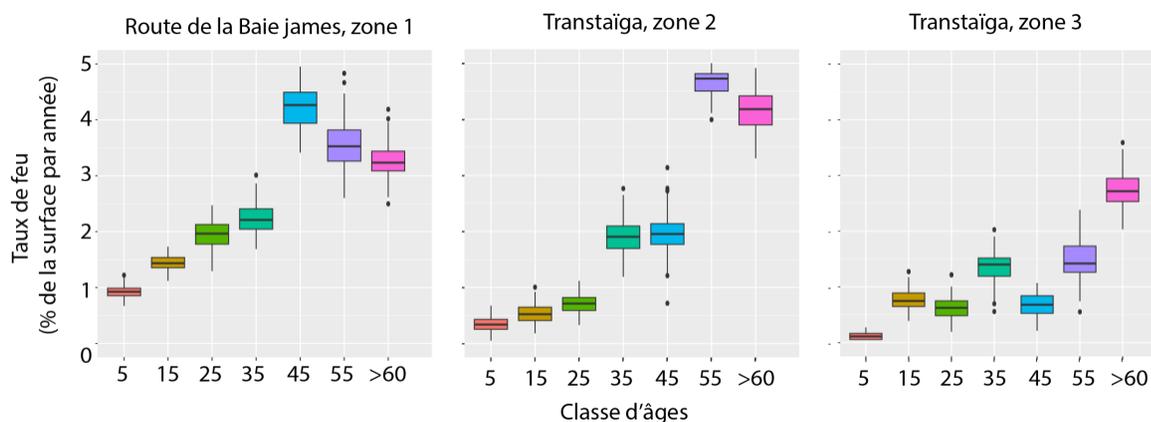


Figure 6: Taux de feux en fonction du temps écoulé depuis le feu précédent pour la période 1840-2021. Pour chaque classe d'âge, l'étalement des taux de brûlage représente les valeurs obtenues en rééchantillonnant 100 fois avec remise les cellules de 2 km² dans la base de données correspondante et en recalculant les taux de brûlage par classe d'âge à chaque itération.

Cartographie des probabilités d'incendies

Les données historiques de la Transtaïga chevauchent les zones 2 et 3 de la région d'étude (Figure 2), permettant une validation indépendante de la taille des feux simulés (Figure 7). De manière générale les feux sont de tailles comparables entre les observations et les simulations, bien que les grands feux, qui interceptent la route sur plus de 30 km, semblent être un peu moins fréquents dans les simulations que les observations pour les zones 2 et 3. Quoi qu'il en soit, les simulations (Figure 3) montrent très clairement le gradient ouest-est d'activité des feux qui existe dans les feux historiques de la route Trantaïga et de route Billy-Diamond (Figures 2), ainsi que dans les polygones de feux cartographiés depuis 1980 à travers le territoire (Figure 2 de l'annexe A). Le scénario correspondant à la situation actuelle (R50_2020) indique des probabilités de feux environ deux fois plus élevées dans la zone 1 que dans les zones 3 et 4, avec des valeurs intermédiaires dans la zone 2, ce qui correspond assez bien aux taux de feux calculés sur les différentes sections de la route Billy-Diamond et de la route Transtaïga (Tableau 1).

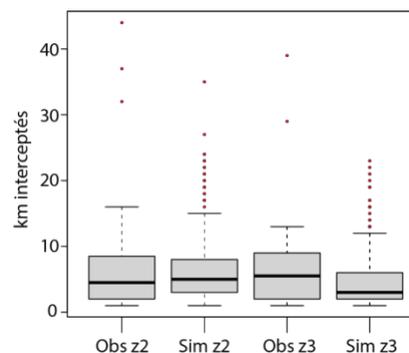


Figure 7 : Comparaison de la longueur des segments de route interceptés par les feux simulés (Sim) dans le scénario R50_2020 avec les feux réellement survenus (Obs) dans la période 1840-2020 pour les zones 2 et 3 de la route Transtaïga.

Le secteur de Radisson-Chisasibi-Wemindji se caractérise par des probabilités de feux très élevées dans tous les scénarios de résistance des combustibles en raison de la prévalence d'un grand massif de forêts matures combiné aux conditions météorologiques favorables de la zone 1. À l'autre extrémité du gradient longitudinal, le secteur des réservoirs LA2 et Caniapiscou montre des probabilités de feux relativement faibles en raison du climat plus froid et plus humide de la zone 4. De manière générale, les rives sous les vents dominants (à l'est) des grands réservoirs et plans d'eau se caractérisent par des probabilités de feux beaucoup plus faibles que les rives opposées. Cet effet protecteur des plans d'eau est responsable de la diminution généralisée des probabilités d'incendies dans les forêts de plus de 50 ans de la zone 1 (Figure 8).

La comparaison des scénarios de climats indique des probabilités de feux environ deux fois plus élevées en 2049 qu'en 2020 (Figures 3 et 8). Cependant, l'effet du réchauffement diminue avec l'âge de la forêt, et cette diminution se manifeste principalement dans la zone 1 où les probabilités de feux sont élevées et où les forêts sont plus jeunes (Figure 8). Lorsqu'on utilise le scénario R0 comme référence pour isoler par soustraction l'effet de la résistance des combustibles sur la diminution des probabilités de feux dans les scénarios R25 et R50, on constate que le réchauffement climatique accentue la résistance dans les scénarios R25 et R50 (Figure 9). De même, les secteurs situés sous le vent dominant des grands plans d'eau sont caractérisés par une augmentation plus faible des probabilités d'incendie entre 2020 et 2049 que le reste du territoire.

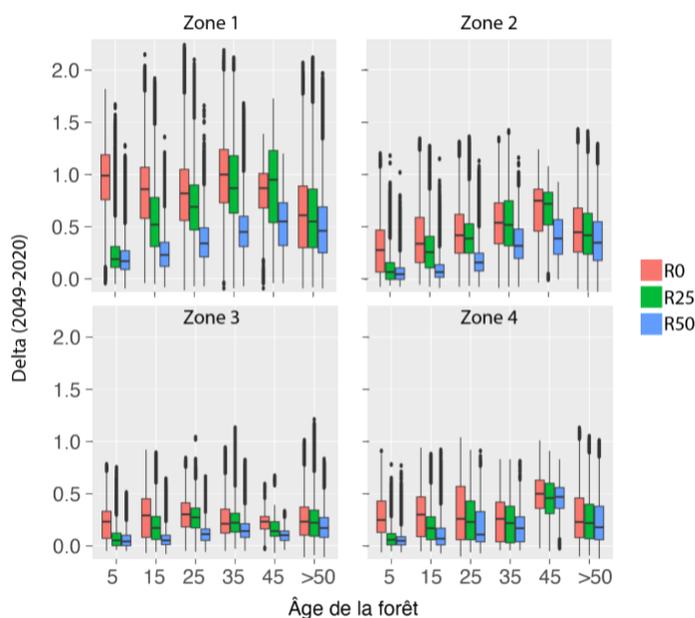


Figure 8: Différence par pixel des probabilités d'incendies entre les climats 2049 et 2020 pour les trois niveaux de résistance des combustibles (R0, R25, R50) et les quatre zones du territoire. Les deltas pour le scénario R0 indique l'effet « pur » du climat, sans interaction avec la résistance des combustibles. Les deltas pour les scénarios R25 et R50 indiquent le potentiel de tamponnement des effets du climat par la résistance au feu des jeunes forêts.

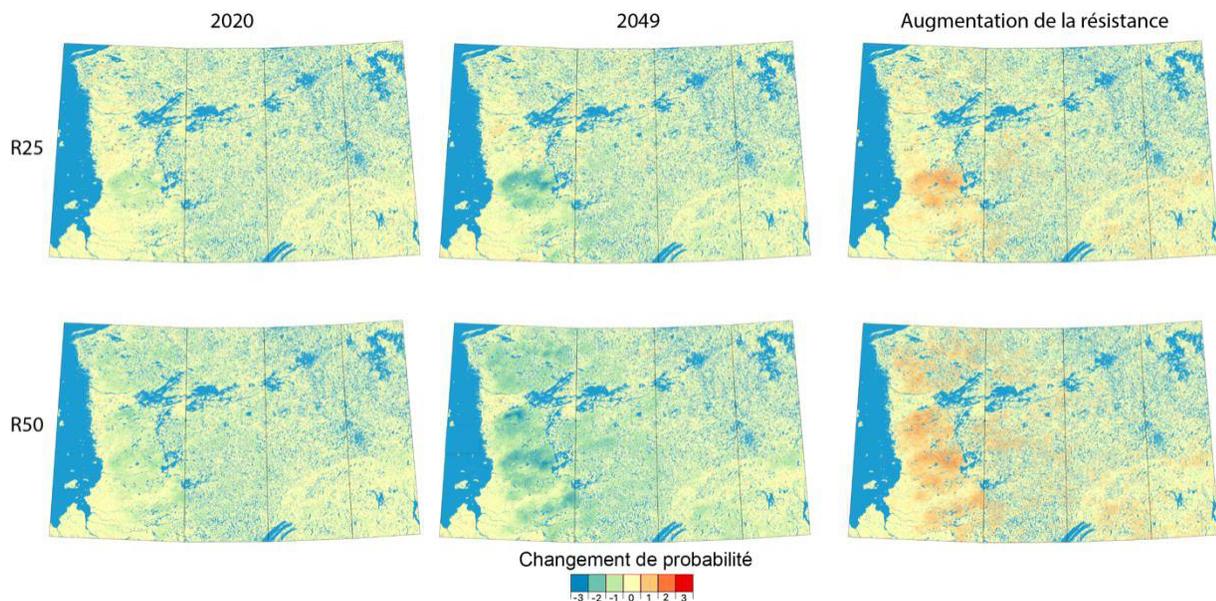


Figure 9 : Effet de la résistance des combustibles sur les probabilités de feux dans les scénarios R25 et R50. L'effet de la résistance est obtenu par soustraction des valeurs de probabilités de celles du scénario R0 correspondant pour chaque pixel. La colonne de droite représente l'augmentation de la résistance entre 2020 et 2049 obtenue en soustrayant les cartes de la colonne de gauche de celles de la colonne du centre.

Domaine des actifs critiques

L'analyse détaillée des polygones de feux simulés et de leurs intersections avec les GAC (groupes d'actifs critiques) indique que le risque d'interaction entre les feux et les actifs pourrait être beaucoup plus important si le climat de l'ensemble ClimEx se réalise, avec environ deux fois plus de feux atteignant les infrastructures pour un même scénario de résistance des combustibles (par exemple R50_2020 vs R50_2049). Le nombre d'allumages étant le même dans tous les scénarios, ce résultat reflète principalement le fait que les feux pourraient parcourir une distance environ 1,5 fois plus grande en 2049 pour atteindre un GAC à partir de leur point d'allumage. En même temps, un plus grand nombre de GAC pourraient être touchés par un seul feu. Sous le scénario R50_2020, 9,5% (43/446) des feux du domaine des actifs critiques touchent au moins 4 GAC comparativement à 21% (132/622) sous le scénario R50_2049. Les GAC continueront à être protégés par la résistance au feu des combustibles, avec environ 30% moins de feux atteignant les infrastructures dans les combustibles R50 que dans les combustibles R0 (par exemple R50_2049 vs R0_2049). On doit cependant noter que les simulations 2020 et 2049 ont été faites avec la même configuration de combustibles et qu'il est probable que les combustibles résistants au feu augmentent en abondance à court ou moyen terme dans le domaine des actifs critiques. Les fortes probabilités d'incendies dans le domaine des actifs critiques dépendent directement du surplus actuel de forêts matures en comparaison du reste du territoire (Parisien et al. 2020). L'occurrence des prochains feux va éventuellement transformer ce surplus en déficit et réduire les probabilités.

Tableau 2 : Nombre de feux touchant un ou plusieurs groupes d'actifs critiques en fonction des scénarios de climat et de combustibles et des saisons (1= printemps, 2=été)

Scénario	Nombre d'actifs critiques touchés par un même feu													
	Saison	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
R50 2020														
1	294	108	33	20	8	2	3							
2	152	51	21	6	3		1							
Total	446	159	54	26	11	2	4							
R25 2020														
1	415	136	32	28	3	2	1	1		1				
2	219	58	27	6	2		1							
Total	634	194	59	34	5	2	2	1		1				
R0 2020														
1	430	160	58	26	9	1								
2	226	70	20	6	3	1	1							
Total	656	230	78	32	12	2	1							
R50 2049														
1	402	202	64	43	23	7	11	2	1					1
2	220	91	34	22	14	4	4	4	1					
Total	622	293	98	65	37	11	15	2	2					1
R25 2049														
1	526	281	86	51	23	10	7	5	5					2
2	335	132	52	28	18	3	7	2		1				
Total	861	413	138	79	41	13	14	7	5	1				2
R0 2049														
1	570	266	98	53	20	7	12	6	4	2				1
2	370	121	53	30	9	4	2	3	3					
Total	940	387	151	83	29	11	14	9	7	2				1

L'analyse des bassins pyrographiques et des ratios de brûlage des bassins pyrographiques, pour l'ensemble des GAC (Figure 10) montre comment le domaine des actifs critiques pourrait devenir beaucoup plus connecté en termes de probabilités de feux, surtout dans le secteur nord-ouest du domaine (Figure 10). Le risque qu'un feu brûlant n'importe où dans ce secteur touche au moins un GAC, pourrait devenir très élevé (>80%; R50_2049) dans un grand nombre de pixels où ce risque est actuellement plus faible (<20%; R50_2020). Les ratios de brûlage sont beaucoup moins importants lorsque les GAC sont considérés individuellement, comme pour la localité de Radisson (Figure 11), mais ils aident à voir comment le risque de propagation d'un feu vers un GAC particulier varie à l'intérieur de son bassin pyrographique. Quelques GAC (Groupes 3, 9, 12, 13; Figure 4) sont entourés de grands plans d'eau et sont caractérisés par de plus petits bassins pyrographiques avec de plus faibles ratios de brûlage du bassin comparativement aux autres groupes (Annexe C). Les infrastructures linéaires montrent une tendance similaire aux infrastructure ponctuelles, et sont plus souvent atteintes par les feux dans le climat 2049 qu'en 2020 (Figure 12). Par exemple, 3,6% des feux interceptent au moins 50 km de route dans le scénario R50_2020 comparativement à 10,7% dans le scénario R50_2049 (Annexe C, Figure 28). Ces valeurs sont plus élevées pour les lignes de transport d'énergie (respectivement 6,4% et 15%) en raison de la plus forte densité de lignes que de routes à travers le territoire.

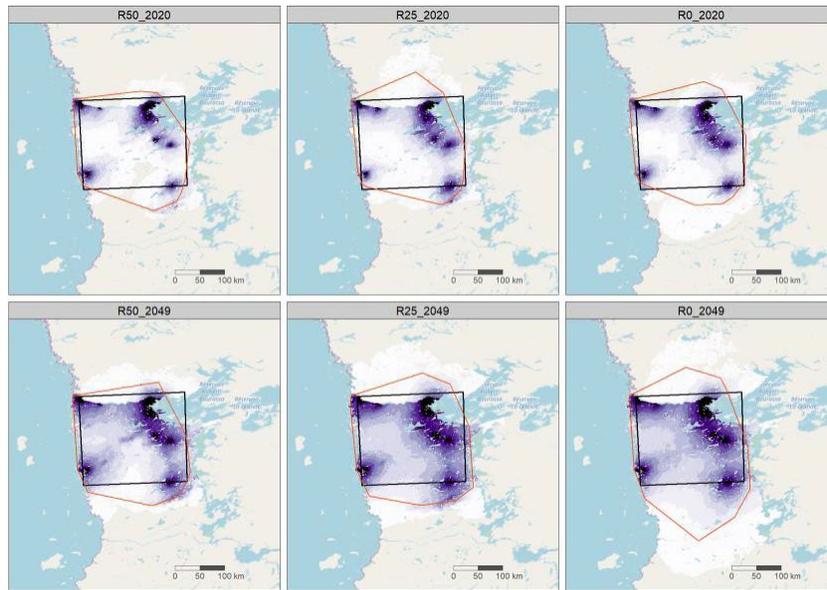


Figure 10: Ratio de brûlage du bassin pyrographique pour l'ensemble des groupes d'actifs critiques. Le ratio de brûlage indique la proportion de feux qui passe dans chaque pixel et qui atteint au moins un GAC. Le trait rouge indique le bassin pyrographique pour chaque scénario.

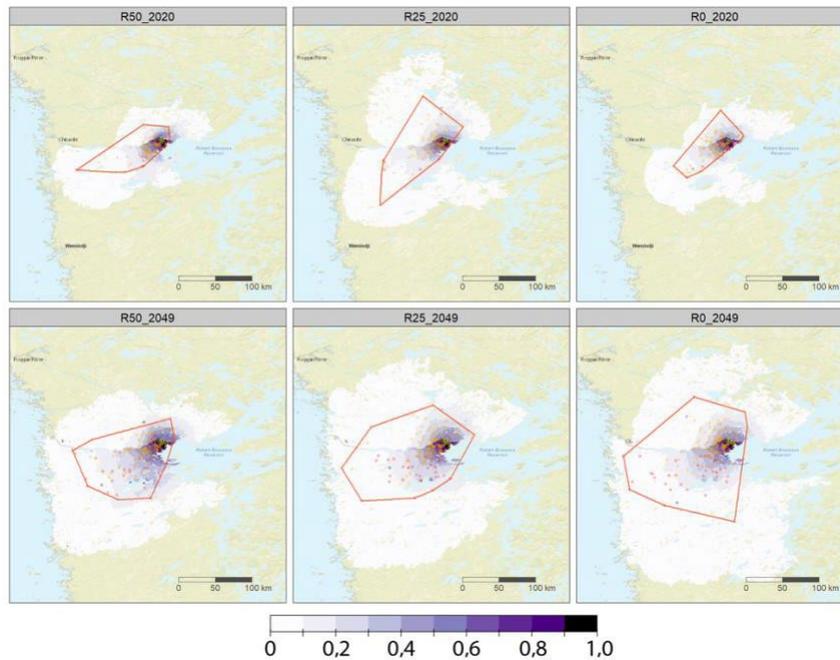


Figure 11: Ratio de brûlage du bassin pyrographique pour la localité de Radisson (GAC no 14). Le trait rouge indique le bassin pyrographique pour chaque scénario. Les points indiquent le point d'allumage des feux qui ont atteint la localité dans les simulations.

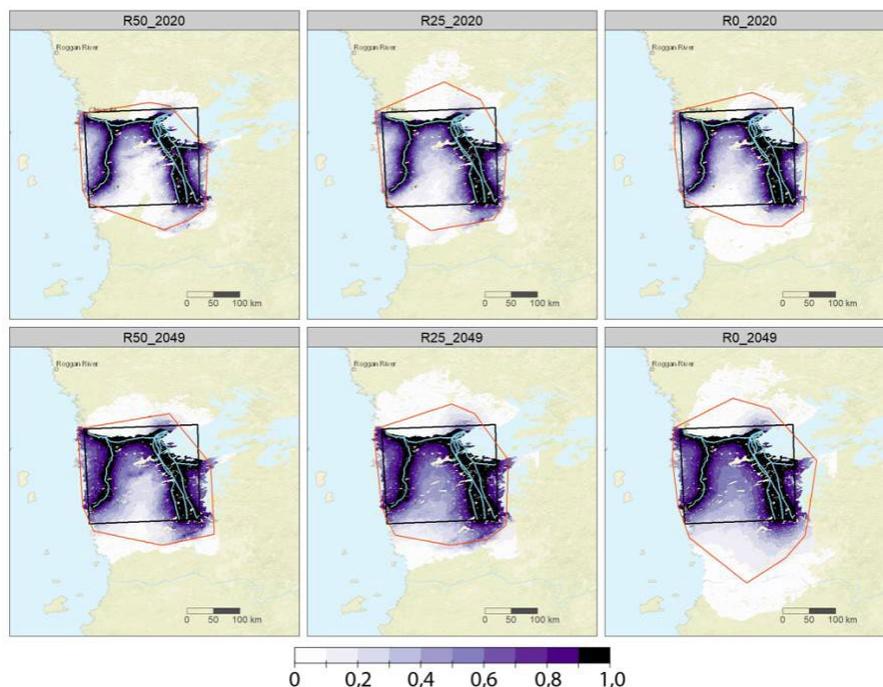


Figure 12 : Ratio de brûlage du bassin pyrographique pour l'ensemble des lignes de transport d'énergie du domaine des actifs critiques. Le ratio de brûlage indique la proportion de feux qui passe dans chaque pixel et qui atteint au moins une ligne. Le trait rouge indique le bassin pyrographique pour chaque scénario.

Manitoba

La carte de probabilité de feux pour le Nord du Manitoba (Figure 13; un seul scénario reflétant les conditions actuelles) montre un secteur de fortes probabilités autour des localités de Ponton, Nelson et Thompson, avec des valeurs deux à trois fois plus élevées que pour le reste du territoire. Cette situation reflète principalement une concentration de combustible favorables à la propagation des feux (type C2).

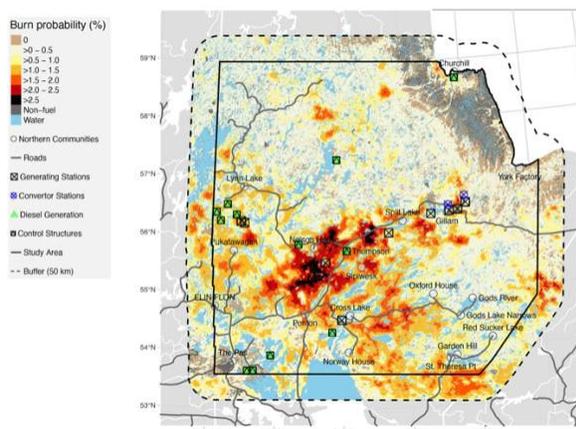


Figure 13 : Carte des probabilités de feux dans le nord du Manitoba

6. Analyse et discussion

Variabilité naturelle

Le territoire du Complexe La Grande se caractérise par des taux de feux très élevés, comparables à ceux de la taïga de l'Ouest du Canada (Erni et al. 2020), en particulier les zones 1 et 2 avec des taux de 1,5 à 2% du territoire incendié par année. Les taux de feux sont plus faibles dans les zones 3 et 4, mais les valeurs reconstituées pour les derniers 200 ans (environ 1% par année) sont beaucoup plus élevées que celles qui peuvent être calculées (< 0,2%) à partir des polygones de feux cartographiés depuis 1980 (Figure 2a dans Erni et al. 2017; Boulanger et al. 2013). Les taux de feux calculés sur les derniers 6000 ans à partir des charbons de bois prélevés dans les sols de sites des zones 3 et 4 suggèrent également une activité de feu relativement importante avec des valeurs autour de 0,7% par année (Payette et Frégeau 2019). Quoiqu'il en soit, des feux de plus de 50 km de long sont survenus tous les 15-20 ans sur le territoire depuis au moins 1850. Des feux de plus de 30 km de diamètre peuvent se développer n'importe où dans le territoire à l'étude.

En même temps, l'activité des feux sur le territoire est fortement limitée par leur rétroaction négative sur le développement des combustibles. Dans les zones à plus forte activité de feux (zones 1 et 2), les taux de feux augmentent à partir de 1% du territoire par année dans les forêts de moins de 20 ans, vers des valeurs de 4-5% dans les forêts de plus de 40 à 50 ans. Ce phénomène, qui est corroboré autant par les données de la route Billy-Diamond que par la Transtaïga, a deux conséquences importantes. Premièrement, il réduit d'environ 50% l'activité des feux sur le territoire en raison de la surabondance de jeunes forêts (Erni et al. 2017). Si les feux se propageaient aussi facilement dans les jeunes forêts que dans les vieilles forêts, des taux de feux de 4-5% par années prévaudraient dans l'ensemble des zones 1 et 2. Deuxièmement, la plus grande résistance au feu des jeunes forêts permet de prévoir que les prochains feux sont plus susceptibles de se propager dans les grands massifs de vieilles forêts. Par exemple, le feu de Eastmain en 2013 (90 km de long) s'est développé dans un des seuls grands massifs de vieilles forêts présent sur le territoire à ce moment (Erni et al. 2017). Ce phénomène de résistance augmente en intensité avec la taille et la fréquence des feux (i.e. dans les zones 1 et 2), des conditions qui forcent les nouveaux feux à croiser plus souvent de grands massifs de jeunes forêts.

Cartographie des probabilités de feux

La cartographie des probabilités de feux avec un modèle de propagation des feux est basée sur les processus de propagation en fonction des forçages descendants et ascendants (Parks et al. 2012). La variabilité spatiale des probabilités d'incendies en sortie des simulations dépend principalement de la cartographie des facteurs ascendants (topographie, hydrologie, combustibles) alors que les valeurs absolues de probabilité sont principalement déterminées par les données météorologiques et par les simplifications et suppositions faites lors de la paramétrisation du régime de feux (nombre de feux par saison, taille des feux, points d'allumage, journées de propagation). Étant donné que la variabilité spatiale des facteurs ascendants est moins sujette à des imprécisions que la calibration des régimes de feux et l'influence de la météo, on devrait surtout analyser la variabilité spatiale des probabilités d'incendies au sein d'un territoire, plutôt qu'analyser les valeurs absolues de probabilité (Parisien et al. 2019). Les niveaux de probabilité peuvent tout de même être interprétés de manière relative si l'on possède de bonnes observations de l'activité des feux dans la région d'étude. Dans notre design expérimental le scénario R50_2020 peut être considéré comme un niveau de référence basé sur les données historiques collectées dans l'ensemble de la zone d'étude et de manière détaillée sur les transects de la route Billy-Diamond et de la Transtaïga.

Nos simulations montrent un effet important des forçages ascendants sur la variabilité spatiale des probabilités de feux, particulièrement pour les secteurs et les scénarios les plus pyrogènes. Cet effet se traduit par une diminution des probabilités de feux sur les rives des grands plans d'eau exposées aux vents dominants, comme pour la série de réservoirs (Rupert, Eastmain, Opinaca, Sakami) dans l'axe nord-sud au centre de la zone 1. L'activité des feux pourrait donc avoir diminué dans la région d'étude par suite de la construction des réservoirs. Parallèlement, le phénomène de résistance à la propagation des feux dans les jeunes forêts est particulièrement évident dans le feu de Eastmain de 2013, qui correspond à une baisse importante des probabilités de feux au sud du domaine des actifs critiques dans les scénarios R50 et R25 (Figure 3). L'effet des jeunes combustibles est considérable avec des probabilités nettement plus basses dans les scénarios R50, que dans les scénarios R0 correspondants (Figure 9). Il est à noter que le scénario R50 représente les conditions de résistance qui ont prévalu depuis 1840. De manière similaire aux jeunes combustibles et aux lacs, la présence de tourbières limite la propagation des feux (Nielsen et al. 2016, Thompson et al. 2019).

En même temps, les simulations montrent un effet important du changement climatique d'ici 2049 avec des niveaux de feux environ deux fois plus élevés pour un même scénario de résistance. Plusieurs études anticipent une diminution de la résistance des jeunes combustibles avec une augmentation de la sévérité de la météo (Parks et al. 2018), une situation qui nous a amené à examiner le scénario R25 dans lequel la propagation des feux est ralentie moins longtemps par les jeunes combustibles que dans le scénario R50. Cependant, nos simulations suggèrent plutôt que l'effet de la résistance va augmenter avec la sévérité de la météo (Figure 9). Plus la météo sera sévère, plus les feux seront grands et fréquents et plus ils interagiront avec des combustibles jeunes et résistants. Toutefois, nos pronostiques pour le futur reposent sur de nombreuses suppositions et leur réalisme est difficile à valider. Par exemple, aucune tendance à long terme d'activité des feux n'est encore décelable à l'échelle des derniers 200 ans (Figures 2 et 5), bien que le climat du Québec-Labrador se soit continuellement réchauffé depuis le début du XX^e siècle (Wang et al. 2022).

Nous avons utilisé la même carte des combustibles pour paramétrer les simulations de 2020 et 2049, de manière à isoler l'effet du climat sans l'effet confondant des changements de configuration des combustibles. De plus, il est impossible de prévoir précisément la configuration des combustibles pour 2049. En réalité, les combustibles vont évoluer avec le temps. Les jeunes forêts vont devenir de moins en moins résistantes aux feux en vieillissant alors que les forêts matures vont continuer d'être incendiées 4-5 fois plus que les jeunes forêts et ainsi se transformer en secteurs résistants au feu. Les grands massifs de vieilles forêts, comme celui qui occupe le domaine des actifs critiques, sont les plus susceptibles de permettre le développement de grands feux, comme ce fut le cas en 2013 avec le feu d'Eastmain (Erni et al. 2017). Bien que nos simulations de 2049 ne soient pas réalistes en ce qui concerne la configuration des combustibles, les compilations qui ne dépendent pas de la position des pixels (Figure 8) révèlent les grandes tendances auxquelles on peut s'attendre. Ces tendances excluent cependant l'effet que pourraient avoir de possibles changements de végétation à l'échelle régionale, comme une augmentation de l'importance des feuillus, plus résistants aux feux que les conifères (Boulangier et al. 2017, Marchal et al. 2020).

Domaine des actifs critiques

Les fortes probabilités de feux dans le domaine des actifs critiques sont redevables à la présence d'un grand massif de forêts matures entre le réservoir Robert-Bourassa et la baie James, en plus des conditions climatiques favorables. L'histoire des feux du transect Billy-Diamond à travers le domaine des actifs critiques montre d'ailleurs un intervalle de temps anormalement long depuis le dernier incendie dans le contexte des derniers 200 ans (Figure 2, premiers 50 km). Des feux importants sont donc hautement probables à court ou moyen termes dans le domaine des actifs critiques.

L'analyse des bassins pyrographiques des feux simulés indique de fortes probabilités qu'au moins un GAC soit touché par n'importe quel feu se rapprochant à une trentaine de km (Figures 10 et 12). Les risques sont moins importants pour les GAC pris individuellement, bien que certains d'entre eux soient plus exposés, comme les localités de Radisson (Figure 11), Chisasibi et Wemindji. Chaque GAC est caractérisé par un patron d'exposition particulier (Annexe B, Figures 5 à 21), en fonction de la physiographie du territoire environnant. La localité de Radisson est plus exposée aux feux se propageant au sud de La rivière La Grande qu'à ceux provenant du nord, en même temps qu'elle est protégée à l'est par le Réservoir Robert-Bourassa (Figure 11). Plus les GAC ont une surface importante et plus ils sont connectés au massif de vieilles forêts, plus ils sont exposés aux feux. Le prochain feu à survenir dans le domaine des actifs critiques modifiera certainement le patron d'exposition des GAC pour les années subséquentes.

À court terme, la meilleure approche pour protéger les GAC vulnérables consiste à les déconnecter des massifs de combustibles en coupant les conifères et en appliquant les autres principes « intelli-feu » (Hirsch et al. 2001, Partners in Protection 2003). Les savoirs autochtones devraient aussi être mis à contribution pour élaborer des stratégies de mitigation et d'adaptation culturellement pertinentes (Miller et al. 2010, Christianson et al. 2014). L'analyse avantage-coûts pourrait être couplée à des simulations de la propagation des feux pour évaluer la pertinence des mesures de mitigation (Thompson et al. 2011). Une suppression des feux à grande échelle pourrait entraîner une augmentation du risque à long terme en raison de l'accumulation des combustibles (Parisien et al. 2020), couplé au climat plus favorable dans le futur. L'activité des feux est un phénomène hautement stochastique et des feux peuvent survenir n'importe où.

7. Conclusion et recommandations

Dans ce projet nous avons amélioré notre connaissance de l'activité des feux sur le territoire du Complexe La Grande depuis 200 ans en reconstituant la taille des feux et les intervalles de temps entre les feux le long de la route Transtaïga. De plus, nous avons cartographié les probabilités de feux dans l'ensemble du territoire La Grande pour les conditions actuelles et pour des scénarios de conditions futures. Nous avons analysé en détails les bassins pyrographiques des infrastructures dans la portion du territoire la plus exposée aux feux. Nous avons cartographié les probabilités de feux dans le nord du Manitoba pour les conditions actuelles. Plusieurs recommandations peuvent être formulées pour donner suite à ce travail :

- 1) Le territoire à l'étude est soumis à une très forte activité de feux depuis au moins 200 ans, particulièrement à l'ouest de LG4. Les probabilités sont extrêmement fortes que des feux importants surviennent à court ou moyen termes, particulièrement dans les grands massifs de forêts matures. Les projets de développement devraient être planifiés en considérant que ce territoire est naturellement soumis à une activité de feux très importante. Maintenant que les probabilités de feux sont mieux documentées autour des infrastructures importantes, des analyses avantages-coûts pourraient aider à identifier des mesures pertinentes de mitigation;
- 2) Les infrastructures vulnérables devraient être déconnectées des grands massifs de forêts matures en coupant les conifères selon les principes « intelli-feux » (Partners in Protection 2003, Hirsch et al. 2001). Les nouvelles infrastructures devraient être construites en considérant les forçages ascendants de l'activité des feux, notamment l'effet protecteur des grands plans d'eau. Les grands massifs de jeunes forêts sont caractérisés par des probabilités de feux relativement faibles, mais leur exposition aux feux
- 3) augmente avec le développement de la forêt, pour culminer 4 à 5 décennies après-feu. Ces secteurs sont des refuges temporaires contre le feu;
- 4) Les cartes de probabilités de feux sont des documents statiques, qu'il faut continuer de mettre à jour avec l'évolution des combustibles;
- 5) Autant que possible, il faut permettre aux feux naturels d'éroder les grands massifs de vieilles forêts. Nous déconseillons une suppression généralisée de l'activité des feux, qui mènerait au développement de très grands massifs de forêts matures et à une augmentation à long terme des probabilités de feux catastrophiques;
- 6) Des analyses de bassins pyrographiques pourraient être faites pour les infrastructures matérielles et immatérielles de la Nation crie. Une attention particulière devrait être portée aux valeurs à risque présentes à des endroits uniques ou rares sur le territoire afin d'identifier les mesures nécessaires pour réduire le risque;
- 7) La carte des probabilités de feux pour le nord du Manitoba est une première étape qui devrait être suivie par une cartographie en conditions futures. De l'expertise a été transmise à Manitoba Hydro pour aider à réaliser cette tâche. Les recommandations # 1-5 s'appliquent également au contexte du Nord du Manitoba.

8. Références

- Balshi MS, McGuiure AD, Duffy P, Flannigan M, Walsh J, Melillo J (2009) Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) approach. *Global Change Biology*, 15, 578–600.
- Boulanger Y, Gauthier S, Burton PJ, Vaillancourt M-A (2012) An alternative fire regime zonation for Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 21, 1052–1064.
- Boulanger Y, Gauthier S, Gray DR, Le Goff H, Lefort P, Morissette J (2013) Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Ecological Applications*, 23, 904–923.
- Boulanger Y, Gauthier S, Burton PJ (2014) A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones. *Canadian Journal of Forest Research*, 44, 365–376.
- Boulanger Y, Girardin M, Bernier PY, Gauthier S, Beaudoin A, Guindon L (2017) Changes in mean forest age in Canada's forests could limit future increases in area burned but compromise potential harvestable conifer volumes. *Canadian Journal of Forest Research*. 47, 755-764.
- Calkin DE, Cohen JD, Finney MA, Thompson MP (2014) How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 746–751.
- Christianson A, Mcgee TK, L'Hirondelle L (2014) The Influence of Culture on Wildfire Mitigation at Peavine Métis Settlement, Alberta, Canada. *Society & Natural Resources*, 27, 9, 931-947.
- Dawe DA, Parisien M-A, Boulanger Y, Boucher J, Beauchemin A, & Arseneault D (2022) Short- and long-term wildfire threat when adapting infrastructure for wildlife conservation in the boreal forest. *Ecological Applications*, 32, e2606
- Erni S, Arseneault D, Parisien M-A, Bégin Y. (2017) Spatial and temporal dimensions of fire activity in the fire-prone eastern Canadian taiga, *Global Change Biology*, 23, 1152-1166.
- Erni S, Arseneault D, Parisien M-A (2018). Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada. *Ecosystems*, 21, 1471-1486.
- Erni S, Wang X, Taylor S, Boulanger Y, Swystun T, Flannigan M, Parisien M-A (2020) Developing a two-level fire regime zonation system for Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 50, 259–273.
- Finney MA 2005. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management* 211, 97–108.
- Flannigan MD, Logan KA, Amiro BD, Skinner WR, Stocks BJ (2005) Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 72, 1–16.
- Forêt Canada (1992) Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt. Groupe de travail sur les dangers d'incendies. Rapport d'information ST-X-3F.
- Gill AM, Stephens SL, Cary GJ (2013) The worldwide “wildfire” problem. *Ecological Applications*, 23, 438–454.
- Hirsch K, Kafka V, Tymstra C, McAlpine R, Hawkes R, Stegehuis H, Quintilio S, Gauthier S, Peck K (2001) Fire-smart forest management: A pragmatic approach to sustainable forest management in fire-dominated ecosystems. *The Forestry Chronicle*, 77, 357-363.
- Johnston LM, Wang X, Erni S, Taylor SW, McFayden CB, Oliver JA, Stockdale C, Christianson A, Boulanger, Y, Gauthier S, Arseneault D, Wotton BM, Parisien M-A, Flannigan MD (2020). Wildland fire risk research in Canada. *Environmental Reviews*, 28, 164–186.
- Jolly WM, Cochrane MA, Freeborn PH, Holden ZA, Brown TJ, Williamson GJ, Bowman DM (2015) Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6, 7537.

- Hély C, Fortin CM-J, Anderson KR, Bergeron Y (2010) Landscape composition influences local pattern of fire size in the eastern Canadian boreal forest: role of weather and landscape mosaic on fire size distribution in mixedwood boreal forest using the Prescribed Fire Analysis System. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 1099-1109.
- Héon J, Arseneault D, Parisien M-A (2014) Resistance of the boreal forest to high burn rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 13888–13893.
- Leduc M, Mailhot A, Frigon A, Martel J-L, Ludwig R, Brietzke GB, Giguère M, Brissette F, Turcotte R, Braun M, Scinocca J (2019) The ClimEx Project: A 50-Member Ensemble of Climate Change Projections at 12-km Resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 58, 663–693.
- Marchal J, Cumming SG, McIntire EJB (2020) Turning Down the Heat: Vegetation Feedbacks Limit Fire Regime Responses to Global Warming. *Ecosystems* 23, 204–216.
- Miller AM, Davidson-Hunt IJ, Peters P (2010) Talking about fire: Pikangikum First Nation elders guiding fire management. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 2290-2301.
- Nielsen S, DeLancey E, Reinhardt K, Parisien M-A (2016) Effects of Lakes on Wildfire Activity in the Boreal Forests of Saskatchewan, Canada. *Forests*, 7, 265.
- Parisien M-A, Junor DR, Kafka VG (2007) Comparing landscape-based decision rules for placement of fuel treatments in the boreal mixedwood of western Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 16, 664–672.
- Parisien M-A, Parks SA, Miller C, Krawchuk MA, Heathcott M, Moritz MA (2011) Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems*, 14, 1141–1155.
- Parisien, M-A, Dawe DA, Miller C, Stockdale CA, Armitage OB (2019) Applications of simulation-based burn probability modelling: A review. *International Journal of Wildland Fire*. 28, 913-926.
- Parisien M-A, Barber QE, Hirsch KG, Stockdale CA, Erni S, Wang X, Arseneault D, Parks SA (2020) Fire deficit increases wildfire risk for many communities in the Canadian boreal forest. *Nature Communications*, 11, 2121.
- Parks SA, Parisien M-A, Miller C (2012) Spatial bottom-up controls on fire likelihood vary across western North America. *Ecosphere* 3, 12.
- Parks SA, Parisien M-A, Miller C, Holsinger LM, Baggett LS (2018) Fine-scale spatial climate variation and drought mediate the likelihood of reburning. *Ecological Applications*, 28, 573-586.
- Partners in Protection (2003) Intelli-feu, protégez votre localité contre les incendies forestiers. *Ressources naturelles Canada en partenariat avec Alberta sustainable Resource Development, Parcs Canada, et le Service canadien des forêts.*
- Payette S, Fréreau M (2019) Long-term succession of closed boreal forests at their range limit in eastern North America shows resilience to fire and climate disturbances. *Forest Ecology and Management*, 440, 101–112.
- Régnière J, St-Amant R (2014) *BioSIM 10 User's Manual*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre Information Report LAU-X-137E.
- Statistique Canada. (2022). Profil du recensement, Recensement de 2021 (base de données), [En ligne]. (<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>).
- Tepley A, Parisien M-A, Wang X, Olivier JA, Flaniggan, MD (2022). Wildfire evacuation patterns and syndromes across Canada's forested regions. *Ecosphere*, 13, e4255.
- Thompson MP, Calkin DE, Gilbertson-Day JW, Ager AA (2011) Advancing effects analysis for integrated, large-scale wildfire risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 179, 217–239.
- Thompson DK, Simpson BN, Whitman E, Barber Q, Parisien M-A (2019) Peatland hydrological dynamics as a driver of landscape connectivity and fire activity in the boreal plain of Canada. *Forests*, 10, 534.

- Wallenius TH, Kuuluvainen T, Vanha-Majamaa I (2004) Fire history in relation to site type and vegetation in Vienansalo wilderness in eastern Fennoscandia, Russia. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 1400-1409.
- Wang F, Arseneault D, Boucher É, Gennaretti F, Yu S, Zhang T (2022) Tropical volcanoes synchronize eastern Canada with Northern Hemisphere millennial temperature variability. *Nature Communications*, 13, 5042.
- Wang X, Thompson D, Marshall G, Tymstra C, Carr R, Flannigan M (2015) Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, 130, 573-586.
- Wang X, Parisien M-A, Taylor SW, Perrakis DDB, Little J, Flannigan MD (2016) Future burn probability in south-central British Columbia. *International Journal of Wildland Fire*, 25, 200-212.
- Wang X, Parisien M-A, Flannigan MD, Parks SA, Anderson KR, Little JM, Taylor SW (2014) The potential and realized spread of wildfires across Canada. *Global Change Biology*, 20, 2518-2530.
- Wang X, Parisien M-A, Taylor SW, Candau J-N, Stralberg D, Marshall G, Little JM, Flannigan MD (2017) Projected changes in daily fire spread across Canada over the next century. *Environmental Research Letters* 12,1748-9326.

ANNEXES:

Annexe A: Cartographie des probabilités de feux dans la taïga canadienne. Rapport technique Burn-P3

Suzanne Lavoie, Dominique Arseneault, Marc-André Parisien, Yan Boulanger
2022-11-03

Annexe B : Cartographie des probabilités de feux dans la taïga canadienne. Valeurs à risques

Suzanne Lavoie, Dominique Arseneault, Marc-André Parisien, Yan Boulanger
2023-03-29

Annexe C : Manitoba Hydro Burn Probability using Burn-P3. Technical Report Suzanne Lavoie, Dominique Arseneault, Marc-André Parisien, Yan Boulanger March 21, 2021