

# Intégration des changements climatiques et développement de la capacité d'adaptation dans la détermination des niveaux de récolte au Québec

Novembre 2020

## Bureau du forestier en chef



# **Intégration des changements climatiques et développement de la capacité d'adaptation dans la détermination des niveaux de récolte au Québec**

## **Direction du calcul et des analyses**

Jean Girard, ing.f., M.Sc.

## **Coordination**

Bruno Forest, ing.f.

Daniel Pelletier, ing.f.

Frédérique Saucier, ing.f., M.Sc.

## **Rédaction**

Lucie Bertrand, ing.f., Ph.D.

Bruno Forest, ing.f.

Frédérique Saucier, ing.f., M.Sc.

Stephen Yamasaki, Ph.D.

## **Collaboration**

Étienne Perrault, ing.f.

Guillaume Cyr, ing.f., M.Sc.

**Révision linguistique** : Claire Fecteau

**Communications** : Lise Guérin

**Cartographie** : Yanick Dionne, tech.f.

## **Référence :**

Forestier en chef, 2020. *Intégration des changements climatiques et développement de la capacité d'adaptation dans la détermination des niveaux de récolte au Québec*, Roberval, Québec, 60 pages.

La présente publication est accessible dans Internet à l'adresse suivante : [www.forestierenchef.gouv.qc.ca](http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca)

Bureau du forestier en chef

845, boulevard Saint-Joseph

Roberval (Québec) G8H 2L6

Téléphone : 418 275-7770

Courriel : [bureau@fec.gouv.qc.ca](mailto:bureau@fec.gouv.qc.ca)

© Gouvernement du Québec

Dépôt légal – 2020

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

ISBN (version électronique) : 978-2-550-88250-3

## Partenaires du projet

Il est important de souligner l'apport des différents partenaires du projet sans qui ce dernier n'aurait pas été possible. Tout d'abord, Ouranos comme partenaire financier et scientifique, Ressources naturelles Canada comme partenaire financier ainsi que le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, par l'entremise du Bureau du forestier en chef, qui s'est chargé de la mise en œuvre. Ce projet est financé par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.



Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada

Québec



## Remerciements

Le Forestier en chef remercie sincèrement les collaborateurs à ce projet. Ces derniers sont issus des gouvernements fédéral et provincial ainsi que de plusieurs universités. Leur participation en tant qu'experts a permis de mettre en interaction plusieurs avancées scientifiques récentes dans un outil de modélisation spatialement explicite. Cette collaboration génère des retombées multiples en permettant de développer de nouvelles connaissances, de renforcer et d'établir des liens entre des résultats de recherche et l'application pratique dans un processus décisionnel.

Collaborateurs	Institutions
Isabelle Auger, stat. ASSQ, M.Sc.	Direction de la recherche forestière, MFFP
Mathieu Bouchard, ing.f., Ph.D.	Direction de la recherche forestière, MFFP
Yan Boulanger, Ph.D.	Centre de foresterie des Laurentides
Sylvain Chouinard, ing.f.	Unité de gestion St-Félicien, MFFP
Steeve Coulombe, ing.f.	Unité de gestion Alma, MFFP
Anny Bisson, ing.f.	Unité de gestion St-Félicien, MFFP
Loïc D'Orangeville, Ph.D.	Université du Nouveau-Brunswick
Anissa Frini, Ph.D.	Université du Québec à Rimouski
Hugues Power, ing.f., Ph.D.	Direction de la recherche forestière, MFFP
Tadeusz Splawinski, Ph.D.	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
Bruno Urli, Ph.D.	Université du Québec à Rimouski



# Table des matières

Introduction .....	1
1. Mise en contexte .....	2
1.1. Contexte légal, mission du Forestier en chef et justification du projet .....	2
1.2. But et objectifs du projet .....	3
2. Cadre scientifique .....	4
2.1. Calcul et détermination des possibilités forestières .....	4
2.2. Climats futurs .....	4
2.2.1. Scénarios climatiques .....	5
2.2.2. Modèles climatiques .....	5
2.3. Processus d'intérêt particulier sous changement climatique en forêt boréale .....	6
2.3.1. Feux de forêt .....	6
2.3.2. Tordeuse des bourgeons de l'épinette .....	7
2.3.3. Croissance de la forêt .....	7
2.3.4. Échecs de régénération .....	7
2.4. Structure et fonctionnement d'un exercice de modélisation .....	7
2.4.1. Structure d'un modèle de simulation .....	7
2.4.2. Modélisation des interactions .....	8
2.5. Incertitude .....	8
2.6. Aide à la décision .....	9
3. Méthodologie .....	10
3.1. Zone d'étude et données forestières .....	10
3.1.1. Description de la zone d'étude .....	10
3.1.2. Stratégie d'aménagement .....	12
3.1.3. Strates d'aménagement et évolution .....	13
3.1.4. Données présentes dans le modèle BFEC-CC .....	13
3.2. Modélisation des changements climatiques .....	14
3.2.1. Information climatique .....	14
3.2.2. Structure de la modélisation .....	15
3.2.3. Incertitude intégrée à l'exercice de modélisation .....	15
3.2.4. Processus modélisés .....	16
3.3. Processus itératif d'apprentissage et de conception des scénarios .....	27
3.3.1. Conception des modalités d'adaptation .....	27
3.3.2. Cheminement du processus d'aide à la décision .....	28
4. Résultats et discussion .....	32
4.1. Apprentissages .....	32
4.1.1. Apprentissages préliminaires .....	32
4.1.2. Apprentissages issus de la simulation des modalités d'adaptation .....	38
4.2. Aide à la décision .....	42
4.2.1. Comparaison des modalités d'adaptation .....	42
4.2.2. Analyses des compromis entre les différentes modalités d'adaptation .....	46



4.2.3.	Classement des modalités d'adaptation .....	48
4.3.	Prise en compte et intégration des différents points de vue dans le projet .....	48
4.4.	Forces et limites à l'interprétation .....	49
4.4.1.	Forces .....	49
4.4.2.	Limites à l'interprétation .....	49
5.	Perspectives.....	50
5.1.	Généralités.....	50
5.2.	Aide à la décision.....	51
5.3.	Feux.....	51
5.4.	Aménagement forestier .....	51
5.5.	Régénération / Répartition des essences.....	52
5.6.	Insectes ravageurs et pathogènes .....	52
5.7.	Productivité .....	52
6.	Exportation du modèle vers d'autres régions .....	52
6.1.	Éléments pouvant être exportés intégralement.....	53
6.2.	Éléments devant être adaptés ou remplacés .....	53
Conclusion .....		54
Recommandation .....		55
Références .....		56
Annexe : Liste des sorties du modèle BFEC-CC .....		60



## Liste des figures

Figure 1. Schéma du processus d'intégration des risques associés aux changements climatiques dans la détermination des possibilités forestières. Les activités liées au processus actuel de détermination des possibilités forestières sont situées dans la boîte bleue. ....	4
Figure 2. Illustration des cinq profils d'évolution des émissions de GES du GIEC. ....	5
Figure 3. Illustration d'une organisation hiérarchique des sous-systèmes et des liens parmi les processus modélisés (palier intermédiaire; la propagation des feux, par exemple), le contexte (palier supérieur; par exemple, le climat) et les processus sous-jacents non modélisés (palier inférieur; par exemple, la décomposition de la matière organique). ....	8
Figure 4. Localisation de la région à l'étude, la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean. ....	11
Figure 5. Probabilités d'initiation des feux dans le paysage. ....	17
Figure 6. Illustration d'une cellule en feu, au centre, qui tente de se propager à chacune de ses huit voisines. .	20
Figure 7. Probabilité de mortalité forte au sein d'une cellule en fonction de la sévérité des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à l'échelle régionale. ....	21
Figure 8. Illustration des règles décisionnelles qui mènent soit à la régénération du peuplement perturbé (en vert) ou à un échec de régénération (en rouge). ....	24
Figure 9. Localisation des zones d'aménagement intensif (en mauve). Ces zones représentent approximativement 25 % de la forêt aménagée. ....	25
Figure 10. Illustration de la recherche binaire appliquée au processus d'optimisation du taux de récolte à rendement maximal soutenu. ....	26
Figure 11. Illustration de la divergence entre les résultats liés aux différents scénarios climatiques (RCP) et la convergence des résultats pour un même scénario climatique de différents modèles climatiques (ESM). ....	32
Figure 12. Abondance des classes d'âge en absence d'aménagement forestier sous (a) le climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. La superficie en échec de régénération apparaît en rouge, en régénération en bleu, la forêt précoce et mature est représentée en vert et les vieilles forêts en mauve. ....	33
Figure 13. Durée moyenne des cycles de feu obtenue sous le scénario <i>statu quo</i> pour les trois scénarios climatiques testés. ....	33
Figure 14. Valeurs moyennes des modificateurs de volume marchand (pondérées par la superficie) au cours des 150 ans de simulation du scénario <i>statu quo</i> sous (a) RCP 4.5 et (b) RCP 8.5 pour le volume résineux (en vert) et feuillu (en orange). La ligne pointillée est la valeur du modificateur (égale à 1) sous climat historique. ...	34
Figure 15. Niveaux de récolte sous le scénario <i>statu quo</i> estimés en intégrant uniquement l'effet des changements climatiques sur la productivité (à gauche) et en intégrant aussi l'effet des feux (à droite). Aucune autre perturbation n'a été intégrée à ces simulations. Ces niveaux de récolte représentent, dans chaque cas, le rendement maximal soutenu étant donné les suppositions fournies au modèle. ....	34
Figure 16. Superficies touchées par année par une mortalité forte due à la tordeuse sous les trois scénarios climatiques au cours de la période de simulation. ....	35
Figure 17. Niveaux de récolte obtenus en simulant le scénario <i>statu quo</i> sous les scénarios climatiques : historique, RCP 4.5 et RCP 8.5. ....	36
Figure 18. Niveaux de récolte annuels de volume résineux (en vert) et feuillu (en orange) au cours des 150 ans de simulation avec le scénario <i>statu quo</i> , sous (a) climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le volume récupéré après feu est représenté en teinte plus foncée (vert foncé pour le résineux et orange foncé pour le feuillu). ....	36
Figure 19. Volume sur pied dans la région au cours des simulations du scénario <i>statu quo</i> , sous (a) un climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le volume disponible pour la récolte est illustré en vert. ....	36
Figure 20. Abondance des classes d'âge sous le scénario <i>statu quo</i> en simulant (a) le climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. La superficie en échec de régénération est illustrée en rouge, la régénération en bleu, la forêt précoce et mature en vert et les vieilles forêts en mauve. ....	37

Figure 21. Analyse de sensibilité montrant l'effet de la contrainte vieilles forêts sur les niveaux de récolte. ....	37
Figure 22. Les niveaux de récolte annuels sous le scénario <i>statu quo</i> , sous les scénarios climatiques (a) historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le niveau de récolte sous climat historique est le niveau de récolte maximal à rendement soutenu. Le niveau de récolte sous RCP 4.5 et RCP 8.5 est ce même niveau de récolte établi sous climat historique, en permettant donc des ruptures de stock en cours de simulation. ....	38
Figure 23. Niveaux de récolte annuels sous un scénario d'enrichissement en feuillus au cours des 150 ans de simulation, en simulant le scénario climatique RCP 4.5. ....	38
Figure 24. Évolution du facteur de correction de Bernier et coll. (2016) en simulant un enrichissement en feuillus sous le climat RCP 4.5. Plus le facteur de correction est élevé, plus la forêt de la région est inflammable. Un facteur de correction égal à 1 correspond au taux de brûlage duquel a été retiré l'effet de la composition (section 3.2.4.1). ....	39
Figure 25. Comparaison des niveaux de récolte sous le scénario <i>statu quo</i> (à gauche) et en appliquant la modalité d'adaptation des zones d'intensification de l'aménagement (à droite). ....	39
Figure 26. Comparaison des niveaux de récolte sous les scénarios <i>statu quo</i> , aménagement intensif, intensif avec une plantation en alternance feuillue et résineuse en zone extensive, et ce dernier scénario, mais en doublant la superficie plantée en zone extensive. ....	40
Figure 27. Niveaux de récolte annuels en appliquant les modalités d'adaptation Intensif, Intensif_F50 et Intensif_F50_Plant2. Le niveau de récolte résineux apparaît en vert et le volume feuillu en orange. Le volume récupéré est en teinte plus foncée. ....	40
Figure 28. Superficie en échec de régénération après 150 ans de simulation sous différentes modalités d'adaptation. ....	41
Figure 29. Les niveaux de récolte sous le scénario Intensif_F50_Plant2, sous les scénarios climatiques (a) historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le niveau de récolte résineux ciblé sous climat historique est le niveau de récolte résineux maximal à rendement soutenu pour le scénario <i>statu quo</i> ; le niveau de récolte sous RCP 4.5 et RCP 8.5 est ce même taux de récolte, en permettant donc des ruptures de stock en cours de simulation. ....	41
Figure 30. Ajustements des niveaux de récolte dans le temps, cherchant à stabiliser l'approvisionnement en matière ligneuse à long terme. Ces résultats sont issus de la simulation du scénario Intensif_F50_Plant2 sous le scénario climatique RCP 8.5. ....	42
Figure 31. Comparaison du taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier sur l'ensemble de l'aire de répartition se trouvant dans la forêt aménagée de la région pour les scénarios sans aménagement et <i>statu quo</i> . ....	43
Figure 32. Comparaison du pourcentage de vieilles forêts sur l'ensemble de la forêt aménagée de la région pour les scénarios d'évolution naturelle et <i>statu quo</i> . ....	43
Figure 33. Variation des indicateurs selon les modalités d'adaptations testées a) sous RCP 4.5 et b) sous RCP 8.5. ....	47



## Liste des tableaux

Tableau 1. Superficie forestière productive et superficie aménagée dans les unités d'aménagement de la région à l'étude .....	11
Tableau 2. Possibilités forestières de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean .....	12
Tableau 3. Données tabulaires utilisées dans le modèle et sources respectives .....	14
Tableau 4. Combinaisons d'ESM et de scénarios climatiques utilisés dans le cadre du projet.....	15
Tableau 5. Processus modélisés, la portion de l'aire d'étude sur laquelle ils agissent et leurs fonctions principales .....	16
Tableau 6. Les tailles (en hectares) des 20 premiers événements de feux (en rangée) pour les 10 premières réalisations de tailles de feu (en colonne) pour la région .....	18
Tableau 7. Facteurs de sélection des feux servant au calcul de la correction de la superficie à brûler annuellement en fonction de la composition, selon Bernier et coll. (2016).....	19
Tableau 8. Facteur de sélection des feux mis à jour aux fins de projet. Une classe d'âge correspondant à un âge de 0 a été incluse pour mieux tenir compte des échecs de régénération dans la correction de la superficie à brûler annuellement .....	19
Tableau 9. Probabilité de défoliation sévère en fonction de l'âge du peuplement .....	22
Tableau 10. Probabilité de défoliation sévère en fonction de l'essence, ou du groupe d'essences, qui domine le peuplement .....	22
Tableau 11. Probabilité d'une mortalité sévère due à la tordeuse associée à la température moyenne annuelle.....	22
Tableau 12. Illustration des processus modélisés dans les scénarios préliminaires testés à l'aide du modèle BFEC-CC .....	27
Tableau 13. Modalités d'adaptation testées dans les différents scénarios. Le scénario <i>Statu quo</i> est inclus pour faciliter la comparaison de ce scénario avec les scénarios d'adaptation .....	28
Tableau 14. Indicateurs retenus pour le processus d'aide à la décision.....	29
Tableau 15. Périodes de temps utilisées pour synthétiser les résultats .....	29
Tableau 16. Canevas de la matrice d'évaluation pour un indicateur donné .....	30
Tableau 17. Préférences du décideur .....	30
Tableau 18. Matrice d'évaluation intégrant les intervalles de préférence (vert), d'inconfort (jaune) et de rejet (rouge) .....	45
Tableau 19. Pointage des modalités selon le scénario climatique et la période de temps .....	48
Tableau 20. Variabilité des indicateurs selon le scénario climatique et les modalités d'adaptation .....	48





## Introduction

Les changements climatiques transforment les écosystèmes forestiers en modifiant leur productivité, leur composition et leur structure. Plusieurs études se penchent sur l'effet de ces changements globaux et prévoient à long terme une intensification du régime des feux de forêt, la migration d'essences et des habitats, une modification des conditions de croissance pour plusieurs espèces typiques de la forêt boréale, davantage de sécheresse et l'apparition de nouvelles espèces envahissantes.

La prise en compte de ces changements est d'actualité dans la gestion du patrimoine forestier et fait partie des dispositions légales de la *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier* du Québec<sup>1</sup>. En effet, il devient essentiel d'appréhender les risques associés aux changements climatiques et de comprendre comment les stratégies d'aménagement forestier appliquées aujourd'hui pourront influencer la forêt de demain.

Au Québec, la mission principale du Forestier en chef est de déterminer les possibilités forestières<sup>2</sup>. Pour ce faire, il modélise l'évolution de la forêt sur un horizon de 150 ans en fonction d'hypothèses basées sur des conditions environnementales stables dérivées de données historiques. Actuellement, dans le cadre de la détermination des possibilités forestières, les risques associés aux changements climatiques sur l'évolution de la mosaïque forestière ne sont pas pris en compte, faute de connaissances et d'une méthodologie compatible avec le calcul des possibilités forestières.

C'est dans ce contexte que le projet *Intégration des changements climatiques et développement de la capacité d'adaptation dans la détermination des niveaux de récolte au Québec* a été soumis à la plateforme canadienne d'adaptation aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada<sup>3</sup> dans son appel de projets de 2017. Sous la gouverne du Forestier en chef, il poursuit l'objectif de développer une approche qui permet une meilleure prise de décision en regard de la pérennité de la ressource forestière et dans le choix des mesures d'adaptation les plus appropriées face aux risques appréhendés. Deux principaux résultats sont attendus de cette initiative :

- une nouvelle approche de modélisation qui explore l'impact des différents scénarios climatiques et des choix d'aménagement stratégiques sur les possibilités forestières et la pérennité des écosystèmes forestiers
- un outil d'aide à la décision qui traduit les multiples résultats techniques du modèle en éléments de décision pour le Forestier en chef au niveau stratégique ainsi que pour les instances régionales qui développent des solutions à l'échelle tactique et opérationnelle.

La principale particularité du projet réside dans l'intégration de plusieurs phénomènes, anthropiques et naturels, habituellement traités séparément dans les modélisations. De plus, l'arrimage des projections scientifiques avec les décisions de gestion et les processus administratifs constitue un véritable défi organisationnel.

Le projet s'est déroulé entre le 1<sup>er</sup> avril 2018 et le 30 novembre 2020. Le présent rapport fait état des travaux réalisés par le Forestier en chef avec la participation de plusieurs collaborateurs. La mise en contexte décrit l'environnement général du projet. Le cadre théorique présente les connaissances scientifiques qui ont été intégrées pour modéliser la mosaïque forestière en contexte de changements climatiques. Suivent ensuite, des chapitres décrivant plus spécifiquement la méthodologie, les résultats obtenus et la discussion. Finalement, le rapport propose des recommandations sur la continuité du projet et le déploiement de la méthode à l'échelle du Québec ou dans d'autres provinces canadiennes.

<sup>1</sup> <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/A-18.1> (voir Chapitre V).

<sup>2</sup> Volume maximal de bois qui peut être prélevé à perpétuité, sans diminuer la capacité productive du milieu forestier.

<sup>3</sup> La Plateforme d'adaptation aux changements climatiques du Canada, établie en 2012, est une tribune nationale qui rassemble des groupes clés du Canada afin qu'ils collaborent sur les priorités en matière d'adaptation aux changements climatiques. <https://www.mcan.gc.ca/climate-change/impacts-adaptations/what-adaptation/plateforme-canadienne-dadaptation-changements-climatiques/>.

# 1. Mise en contexte

La mise en place des *Plans d'action du Québec sur les changements climatiques* 2006–2012 et 2013–2020<sup>4</sup> a généré une importante vague de travaux de recherche portant sur les conséquences des changements climatiques en milieux naturels. Parallèlement, plusieurs se sont aussi penchés sur des solutions ou des réponses possibles face à ces changements en identifiant des mesures d'adaptation ou de lutte contre les changements climatiques. Le véritable défi dans ce projet est de mettre en commun et en interaction ces avancées scientifiques afin de produire des résultats arrimés aux besoins des structures de gouvernance responsables de la gestion des ressources forestières et en particulier du calcul des possibilités forestières. Ultimement, le modèle développé doit être en mesure de s'adapter aux différentes réalités forestières qui caractérisent le territoire et permettre de comparer les effets de différentes modalités d'adaptation.

## 1.1. Contexte légal, mission du Forestier en chef et justification du projet

La *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier* définit les responsabilités du Forestier en chef. Parmi ses fonctions<sup>5</sup>, ce dernier doit :

- déterminer les possibilités forestières
- établir les méthodes, les moyens et les outils requis pour calculer les possibilités forestières des forêts du domaine de l'État et
- conseiller le ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs, notamment en ce qui a trait à la recherche et le développement en matière de foresterie, la limite territoriale et la délimitation des unités d'aménagement et l'optimisation des stratégies d'aménagement forestier.

Des attentes ont été exprimées au Forestier en chef afin que ses travaux tiennent compte de l'effet des changements climatiques. Particulièrement, l'article 48 de la *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*<sup>6</sup> demande de déterminer les possibilités forestières sur la base des objectifs d'aménagement durable des forêts en fonction des objectifs suivants :

- la pérennité du milieu forestier
- l'impact des changements climatiques sur les forêts
- la dynamique naturelle des forêts, notamment leur composition, leur structure d'âge et leur répartition spatiale
- le maintien et l'amélioration de la capacité productive des forêts et
- l'utilisation diversifiée du milieu forestier.

La *Stratégie d'aménagement durable des forêts*<sup>7</sup>, publiée en 2015, présente six défis également à considérer par le Forestier en chef :

- une gestion et un aménagement forestiers qui intègrent les intérêts, les valeurs et les besoins de la population québécoise, dont les nations autochtones
- un aménagement forestier qui assure la durabilité des écosystèmes
- un milieu forestier productif et créateur de richesses diversifiées
- une industrie des produits du bois et des entreprises forestières diversifiées, compétitives et innovantes
- des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques et qui s'y adaptent et
- une gestion forestière durable, structurée et transparente.

<sup>4</sup> <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/plan-action-fonds-vert.asp>.

<sup>5</sup> <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/A-18.1> (Chapitre V, article 46.1 et 48).

<sup>6</sup> <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/A-18.1>.

<sup>7</sup> <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/strategie-amenagement-durable-forets.pdf>.



En 2017, la Vérificatrice générale du Québec<sup>8</sup> avait exprimé une inquiétude quant à la progression des travaux du Forestier en chef puisque « ... la modélisation de l'impact des changements climatiques et des perturbations naturelles sur l'état et la productivité des écosystèmes forestiers a été reportée par le Bureau du forestier en chef, sans nouvelle échéance. Ces connaissances sont pourtant importantes pour cibler les meilleurs scénarios sylvicoles ». En effet, les travaux portant sur les effets des changements climatiques, bien qu'ayant été amorcés, n'étaient pas suffisamment avancés pour leur prise en compte dans la détermination des possibilités forestières pour la période 2018-2023, annoncée en 2016.

C'est donc dans ce contexte qu'a été développé le projet afin de soutenir le Forestier en chef dans ses fonctions principales en lui fournissant les informations et les connaissances pertinentes sur les impacts et les adaptations possibles des forêts du domaine de l'État aux changements climatiques.

## 1.2. But et objectifs du projet

Le projet *Intégration des changements climatiques et développement de la capacité d'adaptation dans la détermination des niveaux de récolte au Québec* a pour but d'entreprendre le processus d'intégration des mesures d'adaptation aux changements climatiques dans le processus de détermination des possibilités forestières. Cette démarche cherche à développer une approche qui permettra une meilleure prise de décision en regard de la pérennité de la ressource forestière et dans le choix des stratégies d'aménagement forestier les plus appropriées face aux risques appréhendés. Elle vise à répondre aux exigences de la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier et à guider les choix stratégiques d'aujourd'hui qui permettent d'assurer la pérennité de la forêt et d'une industrie forestière résiliente dans les conditions futures.

Plus spécifiquement, les objectifs du projet étaient de :

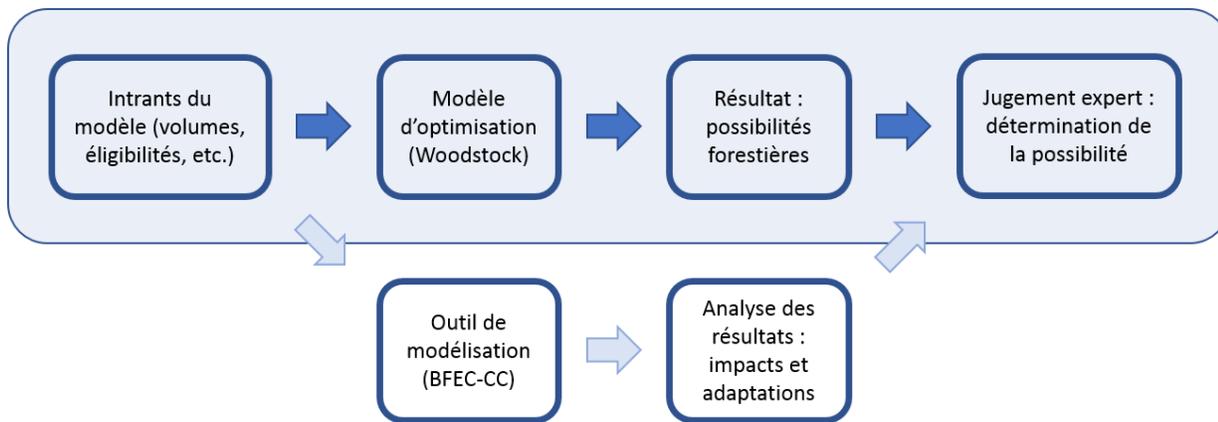
- développer une modélisation régionale intégrant les effets des changements climatiques
- modéliser l'effet de l'aménagement et des perturbations naturelles
- développer et tester des modalités d'adaptation et
- communiquer les résultats en soutien à la prise de décision.

La démarche entreprise dans le contexte de ce projet ne vise pas à remplacer le calcul des possibilités forestières. Il s'agit plutôt d'un processus complémentaire qui est évalué indépendamment et qui vise à informer les décideurs sur les risques associés aux différents scénarios climatiques (Figure 1).

Suite au projet, l'approche pourra être améliorée (section 5) et appliquée à l'ensemble des forêts du domaine de l'État (section 6), soit plus de 45 millions d'hectares. Les informations stratégiques obtenues pourront se répercuter éventuellement en des retombées directes pour la détermination des possibilités forestières et l'aménagement de la forêt.

<sup>8</sup> [https://www.vgq.gc.ca/Fichiers/Publications//rapport-annuel//2017-2018-printemps//fr\\_Rapport2017-2018-PRINTEMPS-Chap04.pdf](https://www.vgq.gc.ca/Fichiers/Publications//rapport-annuel//2017-2018-printemps//fr_Rapport2017-2018-PRINTEMPS-Chap04.pdf) (voir p. 14, article 51).





**Figure 1. Schéma du processus d'intégration des risques associés aux changements climatiques dans la détermination des possibilités forestières. Les activités liées au processus actuel de détermination des possibilités forestières sont situées dans la boîte bleue.**

## 2. Cadre scientifique

Cette section présente l'information scientifique et les concepts sur lesquels s'appuient les travaux du projet.

### 2.1. Calcul et détermination des possibilités forestières

Le calcul des possibilités forestières est un exercice de modélisation sur 150 ans de l'évolution de la forêt en fonction des effets de l'aménagement forestier. La modélisation se fait par programmation linéaire qui est une technique de programmation mathématique qui recherche la solution optimale à un problème posé par une fonction objective et des contraintes sous forme d'équation linéaire (Davis et coll., 2005). La stratégie d'aménagement qui permet des possibilités forestières maximales tout en respectant l'atteinte des objectifs d'aménagement durable des forêts est recherchée (Bureau du forestier en chef, 2013). Les plans d'aménagement des régions sont développés par les ingénieurs forestiers des directions régionales, en respectant les orientations du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, tout en prenant en compte les besoins exprimés par les utilisateurs de la forêt. Dans le processus du calcul des possibilités forestières, les régions préparent la stratégie d'aménagement.

Finalement, le calcul des possibilités forestières intègre les connaissances les plus à jour sur l'état de la forêt, son évolution et les effets de son aménagement. Plusieurs contraintes sont appliquées dans la modélisation pour respecter les objectifs d'aménagement durable et obtenir un rendement soutenu.

« Le rendement soutenu est une mesure de gestion du risque visant à empêcher la surexploitation de la matière ligneuse et à assurer à l'industrie une stabilité dans l'approvisionnement en bois. Pour ce faire, les volumes de bois récoltés aujourd'hui ne doivent pas entraîner une diminution de la possibilité de récolte future et le niveau de récolte doit être stable dans le temps. » (Bureau du forestier en chef, 2013).

Le Forestier en chef détermine les possibilités forestières en se basant sur les résultats du calcul, la révision externe de ces derniers, des analyses complémentaires et sur les recommandations de l'ingénieur forestier responsable du calcul.

### 2.2. Climats futurs

Dans le domaine de la climatologie, la projection vers le futur des conditions climatiques se déroule en deux étapes distinctes :

- la création de scénarios climatiques et
- la modélisation des climats futurs en fonction des scénarios climatiques.



## 2.2.1. Scénarios climatiques

En 2014, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié son cinquième rapport sur l'évolution future du climat (AR5, GIEC, 2014). Dans celui-ci, le GIEC présente cinq profils d'évolution des émissions des gaz à effet de serre (GES). Ces profils représentatifs d'évolution de concentration de GES (Figure 2), appelés « representative concentration pathways » (RCP), se basent sur des ensembles de suppositions en lien avec, par exemple, la taille de la population mondiale, l'intensité de l'activité économique, la consommation d'énergie et le développement et la mise en application de nouvelles technologies.

Les répercussions d'une évolution des concentrations des GES sur le bilan énergétique de la Terre sont projetées dans le futur à l'aide de modèles numériques. L'intensité de ces répercussions sur les températures à la surface de la Terre s'exprime en termes de forçage radiatif (en  $W/m^2$ ). Plus le forçage radiatif est grand, plus la température moyenne annuelle sera élevée. Les profils d'évolution des GES sont nommés en termes de forçage radiatif qui en résulte en 2100, les numéros de scénario RCP reflétant le forçage radiatif en  $W/m^2$  : RCP 2.6 (les concentrations de GES futures les plus faibles), RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5. Ce dernier scénario mène au plus important réchauffement planétaire, soit une augmentation de température annuelle moyenne à l'échelle globale se situant entre 2,6 et 4,8°C en 2100 selon les différents modèles de circulation générale.

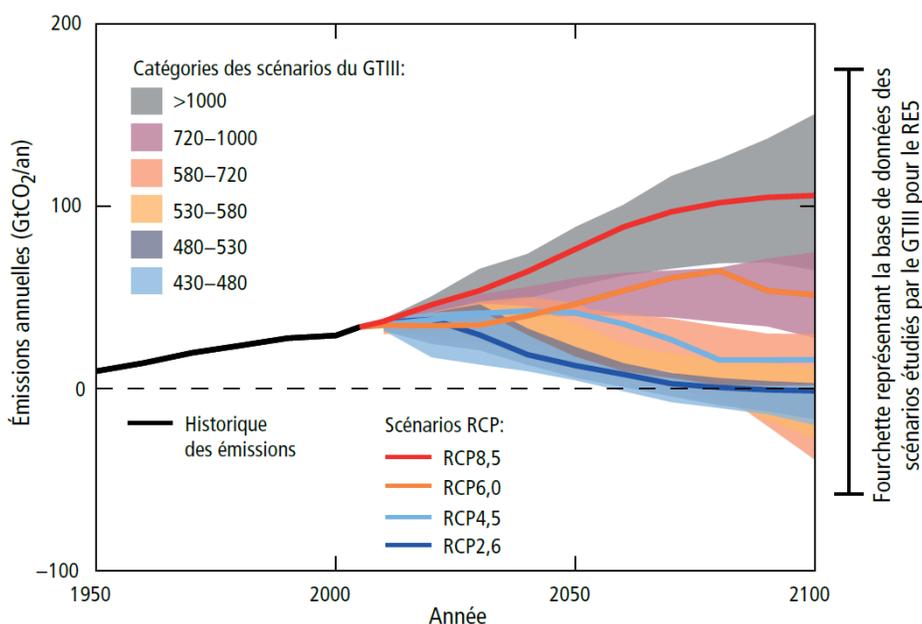


Figure 2. Illustration des cinq profils d'évolution des émissions de GES du GIEC<sup>9</sup>.

## 2.2.2. Modèles climatiques

À partir des profils d'évolution des émissions des GES, différents groupes de recherche ont modélisé le climat futur. Pour y arriver, des modèles de circulation générale (GCM pour « General Circulation Model ») ont été construits. Ils simulent l'état et le comportement de l'atmosphère sous l'influence des concentrations atmosphériques des GES, de la radiation solaire et des caractéristiques de la surface terrestre. De plus, certains modèles, dits « océan-atmosphère » ou « couplés », simulent aussi les liens de cause à effet entre les océans et l'atmosphère. Finalement, ces modèles couplés sont souvent combinés à des modèles de transport des substances chimiques importantes dans un contexte de changements climatiques (par exemple, le CO<sub>2</sub>) pour former des modèles de systèmes terrestres (ESM pour « earth system models »).

<sup>9</sup> Figure tirée du rapport AR5, GIEC 2014.

## 2.3. Processus d'intérêt particulier sous changement climatique en forêt boréale

Selon la littérature scientifique, les changements climatiques influencent déjà (Hogg et Bernier, 2005; Lemmen et coll., 2008; Williamson et coll., 2009; Mitton et Ferrenberg, 2012) et influenceront davantage plusieurs composantes des écosystèmes forestiers (Lindner et coll., 2010; Gauthier et coll., 2014; Scheffers et coll., 2016). Il est donc possible d'anticiper un grand nombre d'impacts à partir de la littérature.

### 2.3.1. Feux de forêt

Les feux de forêt sont d'une très grande importance en forêt boréale (Stocks et coll., 2003; Gauthier et coll., 2015). Ils influencent la structure, l'âge et la composition des forêts et par l'entremise de ces facteurs, un très grand nombre de caractéristiques des écosystèmes forestiers, telles que la disponibilité en matière ligneuse et en habitats fauniques.

#### 2.3.1.1. Le climat et les feux de forêt

L'influence des conditions atmosphériques sur les feux de forêt est bien documentée (Flannigan et Wotton, 2001). Cette influence se manifeste à la fois à l'échelle d'une saison de feux (Van Wagner, 1987), mais aussi sur une échelle temporelle plus longue, celle du climat (Flannigan et Wotton, 2001; Girardin et Mudelsee, 2008). Depuis quelques années, certains auteurs ont rapporté un lien entre le réchauffement climatique anthropogénique et une augmentation de la superficie brûlée annuellement (Gillett et coll., 2004; Hanes et coll., 2019). Au cours des dernières décennies, plusieurs auteurs, à l'aide de modélisation numérique, ont projeté l'effet des changements climatiques sur les régimes de feux (Stocks et coll., 1998; Flannigan et coll., 2005; Boulanger et coll., 2014 et 2017; Gauthier et coll., 2015).

#### 2.3.1.2. Modélisation des feux

Il existe plusieurs types de modèles de feux. Les feux peuvent être modélisés de façon spatialement explicite (Fall et coll., 2004) ou non (Boulanger et coll., 2014). La modélisation peut être mécanistique, approche selon laquelle la composition des peuplements, la topographie et la vitesse du vent, par exemple, peuvent servir à calculer la vitesse de propagation et l'intensité des feux (Van Wagner, 1987; Yamasaki et coll., 2008; Tymstra et coll., 2010). La modélisation des feux peut aussi être empirique (Fall et coll., 2004; Boulanger et coll., 2014). Pour ce genre de modélisation, une analyse statistique des relations entre les superficies brûlées et les facteurs déterminants pour le comportement des feux (par exemple, la météo ou l'abondance des différents combustibles) sert de base à la simulation des feux au sein des modèles. Le degré de complexité des différents modèles de feu est aussi très variable.

Pour mieux représenter la répartition des feux à grande échelle spatiale, certains auteurs ont développé des systèmes de zonage. À l'intérieur des différentes zones de feux, les paramètres de feu sont considérés comme étant homogènes (Boulanger et coll., 2014 et 2017; Bouchard et coll., 2015) et les régimes de feu sont modélisés en fonction de ces zones.

#### 2.3.1.3. Effet de la composition forestière sur les feux

Depuis plusieurs années, il y a une reconnaissance que la composition de la forêt influence le comportement des feux (Van Wagner, 1987). Les travaux récents de Bernier et coll. (2016) démontrent comment, à l'échelle du Canada, la composition des peuplements forestiers, qu'ils soient feuillus ou résineux, jeunes ou vieux, influence la propension des peuplements à brûler à travers le paysage. À partir de ces résultats, Bernier et coll. (2016) calculent un facteur d'ajustement au risque de feu pour chacune des zones de feu à l'étude, qui sert à ajuster le taux de brûlage en fonction de la composition des paysages forestiers. Ces facteurs d'ajustement peuvent par la suite être utilisés afin de tenir compte des changements de la végétation sur la projection des régimes de feux futurs.



### 2.3.2. Tordeuse des bourgeons de l'épinette

La tordeuse des bourgeons de l'épinette est un des insectes les plus destructeurs des peuplements de conifères de l'Amérique du Nord (MFFP, 2016). Lors d'épidémies, la tordeuse des bourgeons de l'épinette est responsable de la défoliation sur une superficie importante de la forêt au Québec, particulièrement dans les peuplements mûrs de sapin baumier, d'épinette blanche et dans une moindre mesure, d'épinette noire (Bouchard et coll., 2015). En effet, lors de la dernière épidémie (1967 à 1992), la tordeuse aurait entraîné la mortalité d'environ quatre millions d'hectares de forêt, en plus d'une diminution d'environ 180 millions de mètres cubes de sapin dans la forêt du Québec (MFFP, 2016). La défoliation au sein d'un peuplement peut être légère ou sévère, notamment selon la composition et la structure d'âge des peuplements. Lorsque la défoliation est suffisamment sévère, elle peut engendrer une mortalité importante parmi les tiges du peuplement (Bouchard et coll., 2015).

Les changements climatiques auront des effets importants sur les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Régnière et coll., 2012 et 2019). Plus spécifiquement, la tordeuse est limitée au nord de sa distribution par les températures trop froides, puisqu'elle n'est pas capable de compléter son cycle vital dans ces conditions (Régnière et coll., 2012). Sa performance biologique est également moins bonne dans la partie sud de sa distribution, puisque les températures hivernales trop chaudes nuisent à l'entrée en diapause et affaiblissent l'insecte (Han et Bauce, 1998). De façon générale, en fonction des connaissances sur la physiologie de la tordeuse, un déplacement probable vers le nord de la zone dans laquelle les impacts des épidémies futures seront les plus importants est anticipé (Régnière et coll., 2012).

### 2.3.3. Croissance de la forêt

Le climat est un déterminant important de l'abondance et de la productivité des essences résineuses et feuillues en forêt. Les changements climatiques pourraient modifier de façon importante la concordance entre l'habitat actuel des essences et leur habitat dans le futur (Périé et de Blois, 2016). En effet, des recherches récentes suggèrent que la productivité des essences en forêt boréale au Québec pourrait être modifiée sous l'effet des changements climatiques, avec des accroissements dans les régions plus froides et des baisses dans les régions plus chaudes caractérisées par des déficits hydriques (D'Orangeville et coll., 2018).

### 2.3.4. Échecs de régénération

Certaines espèces d'arbres, comme l'épinette noire et le pin gris, amassent une grande quantité de propagules dans leurs banques de graines aériennes (appelée sérotinisme), qui sont ensuite libérées par le passage du feu et dispersées par le vent. La production élevée de graines, combinée avec la résistance au feu des cônes de pin gris et au regroupement des cônes en grappe chez l'épinette noire (Splawinski et coll., 2019b), aide généralement à maintenir une composition et une densité similaires après feu, suivant ainsi une dynamique d'autorégulation dans le temps (Johnstone et coll., 2010). Toutefois, lorsque le feu brûle les arbres d'un peuplement avant que ceux-ci n'aient atteint la maturité reproductive, le peuplement peut tomber en échec de régénération, car il peut y avoir un manque de propagules pour assurer sa propre régénération.

Les échecs de régénération après le passage du feu ont fait l'objet de plusieurs études (Payette et coll., 2000; Payette et Delwaide, 2003; Côté et Gagnon, 2002; Côté, 2003 et 2004; Girard et coll., 2008 et 2009). Splawinski et coll. (2019a) ont documenté comment le cycle de feu, l'aménagement forestier et la maturité des essences influencent la fréquence des échecs de régénération en forêt boréale au Québec.

## 2.4. Structure et fonctionnement d'un exercice de modélisation

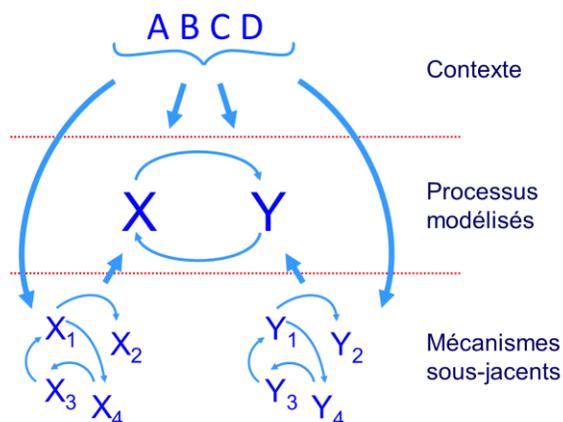
### 2.4.1. Structure d'un modèle de simulation

La structure d'un modèle de simulation – c'est-à-dire le choix des éléments à inclure et comment ceux-ci sont mis en interaction, détermine la nature des questions auxquelles il est possible de répondre. Le modèle doit donc être suffisamment complexe pour intégrer les détails nécessaires et permettre des interactions parmi les processus clés, mais sans plus. Le principe de parcimonie s'avère d'une grande pertinence dans ce contexte, car la structure

la plus simple et qui répond tout de même aux interrogations soulevées sera la meilleure (Box, 1976).

Dans toute modélisation, certains processus se situent à une échelle trop fine pour pouvoir justifier leur inclusion, car les gains en capacité de répondre aux questions posées sont trop faibles par rapport à l'effort additionnel requis pour inclure ces mécanismes dits « sous-jacents » (Figure 3). Par exemple, la décomposition microbiologique de la litière foliaire n'est que très rarement incluse dans les modèles à l'échelle du paysage.

D'autres processus, au contraire, se développent à une échelle beaucoup trop large pour qu'ils soient intégrés à ceux modélisés. Dans ce cas, il est question de « contexte » aux processus modélisés (Figure 3). Le climat, par exemple, fournit un contexte pour la forêt et ses écosystèmes.



**Figure 3. Illustration d'une organisation hiérarchique des sous-systèmes et des liens parmi les processus modélisés (palier intermédiaire; la propagation des feux, par exemple), le contexte (palier supérieur; par exemple, le climat) et les processus sous-jacents non modélisés (palier inférieur; par exemple, la décomposition de la matière organique).**

Même si tous les processus pertinents ne peuvent être intégrés au même modèle, il est souvent nécessaire de tenir compte de la contribution des contextes et des mécanismes sous-jacents aux fonctionnements des processus modélisés. Pour relier les systèmes d'ordre hiérarchique supérieur et inférieur aux processus modélisés, deux options se présentent : les couplages forts et les couplages faibles. Deux modèles reliés par couplage fort fonctionnent en même temps et sont reliés dynamiquement, c'est-à-dire que les extrants d'un des modèles sont acheminés en temps réel à l'autre modèle. Ce type de couplage engendre une rigidité structurelle qui peut devenir rapidement difficile à gérer. Inversement, deux modèles peuvent être reliés par couplage faible lorsque les contextes et les processus sous-jacents sont exécutés en amont de la modélisation des processus. L'information transmise par couplage faible qui alimente les processus modélisés peut être communiquée dans des formats standardisés.

## 2.4.2. Modélisation des interactions

Les changements climatiques auront des effets directs, par exemple l'effet des feux sur l'état des arbres brûlés. Il existe aussi un grand nombre d'effets indirects, telle la contraction de l'habitat du caribou forestier due au rajeunissement des paysages forestiers. Ces comportements, issus des interactions parmi les multiples composantes des écosystèmes, donnent lieu à des propriétés émergentes, c'est-à-dire des comportements dus aux interactions parmi les composantes des écosystèmes.

Pour fournir une image plus complète des impacts possibles, un modèle doit donc être capable de capter les effets directs des changements climatiques, mais aussi les effets indirects et les interactions importantes au sein des écosystèmes forestiers.

## 2.5. Incertitude

Il existe, dans les systèmes naturels, un très large éventail de sources d'incertitude : le climat, les perturbations naturelles, les conditions édaphiques ainsi que la réponse des arbres aux changements des conditions



environnementales en sont des exemples. Ces sources d'incertitude, le résultat d'une compréhension incomplète ou d'un comportement stochastique, contribuent aux défis de l'aménagement forestier. Traditionnellement, très peu de sources d'incertitude sont intégrées à la planification forestière, c'est le cas depuis les premières formalisations de l'aménagement forestier. Par contre, de nombreux auteurs soulignent l'importance de l'intégration de l'incertitude en aménagement forestier (Thompson, 1968; Weintraub et Abramovich, 1995; Yousefpour et coll., 2012). L'incertitude devient importante dans un contexte de planification stratégique de l'aménagement forestier, particulièrement pour les écosystèmes dominés par les perturbations naturelles comme la forêt boréale, car la performance à long terme des stratégies d'aménagement est fortement affectée par les différentes sources d'incertitude.

## 2.6. Aide à la décision

Dans le contexte d'un projet générant une quantité d'informations importantes, un décideur a besoin de support pour être en mesure de dégager les éléments qu'il doit prendre en compte dans son processus décisionnel.

En effet, le projet cherchera ici à comparer des modalités d'adaptation différentes sur la base d'un certain nombre d'indicateurs, ce qui représente une situation décisionnelle assez classique. Toutefois, cette situation est complexifiée par l'incertitude reliée aux modèles et aux scénarios climatiques ainsi qu'à celle inhérente au comportement de la forêt confrontée à des changements de conditions évolutives. De surcroît, le décideur ne peut prendre d'orientations de gestion en fonction de la situation actuelle basée sur des données historiques, car il veut développer une vision du futur pour axer les actions à court, moyen et long terme. La dimension temporelle revêt alors une composante fondamentale de la situation décisionnelle. Finalement, le décideur, ayant son propre système de préférences, sera confronté à exprimer ses valeurs et sa sensibilité face à certains risques.

Une situation décisionnelle aussi complexe ne peut se résoudre avec les moyens usuels (Roy, 1992). Il est alors justifié d'avoir recours à des méthodes relevant des sciences de la décision afin de transformer les résultats de la modélisation en apprentissages, puis en informations de gestion.

Développée depuis les années 1970, l'aide à la décision fait partie des approches pour résoudre ce genre de situations complexes. Elle est particulièrement appropriée en présence de plusieurs décideurs ayant des préférences différentes. Les dimensions multiples de la situation à l'étude en justifient l'utilisation.

En effet, l'aménagement forestier durable est défini comme un aménagement qui « vise à maintenir ou à améliorer la santé à long terme des écosystèmes forestiers, afin d'offrir aux générations d'aujourd'hui et de demain les avantages environnementaux, économiques et sociaux que procurent ces écosystèmes » (MFFP, 2020). En plus d'assurer simultanément l'efficacité économique, l'équité sociale et le maintien de l'intégrité de l'environnement, le processus décisionnel devrait tenir compte des conséquences immédiates et futures des décisions sur un horizon correspondant à la durée de régénération de la forêt. Ce processus doit alors être entrepris dans une perspective de recherche d'équilibre entre les différents horizons temporels notamment sur la préservation de la diversité biologique, le maintien de la productivité des écosystèmes forestiers, le maintien des avantages socio-économiques multiples, et la prise en compte des valeurs et des besoins exprimés par la population. Deuxièmement, le processus décisionnel doit idéalement se dérouler dans un contexte de partage de vision car plusieurs parties intéressées aux valeurs et points de vue différents et éventuellement opposés sont concernées. Troisièmement, les conséquences des options d'aménagement doivent être évaluées à court, moyen et long terme. Par ailleurs, plusieurs événements incontrôlables (tels que les incendies forestiers ou les infestations d'insectes) pourraient surgir et faire en sorte que les évaluations deviennent imprécises, voire non disponibles. Le problème est alors sans doute temporel, évoluant dans un contexte d'incertitude.

Particulièrement, l'aide multicritère à la décision est un champ de connaissances à part entière (Urli, 2013). Elle s'appuie sur la recherche opérationnelle et sur d'autres disciplines comme la psychologie, la sociologie, l'économie et l'informatique, par exemple (Martel, 1999). C'est une démarche scientifique qui permet d'éclairer les décisions dans des contextes complexes tels que celui du projet. L'aide à la décision devient multicritère lorsque la décision ne peut être prise en se basant sur un seul critère.

L'aide multicritère à la décision a été décrite comme un outil hautement pratique en aménagement forestier en fournissant un cadre formel pour la prise de décision (Mendoza et Prabhu, 2003; Munda, 2004; Kangas et Pukkala, 1992). Elle permet la prise en compte de plusieurs critères économiques, environnementaux ou sociaux, sans nécessairement les agréger dans une échelle commune (Bertrand, 2001). L'objectif de l'aide multicritère à la décision est de donner la solution de meilleur compromis possible en prenant compte de tous les critères, sans que ces derniers soient optimaux. Il n'existe ainsi généralement pas de solution optimale sur tous les critères simultanément étant donné la réalité conflictuelle de ces derniers.

L'aide multicritère à la décision n'est donc pas une approche planificatrice où différentes informations sont recueillies et traitées de façon à imposer au décideur une solution supposément optimale. Elle est plutôt une approche constructive structurée qui vise à fournir des outils permettant de progresser dans la résolution d'un problème complexe de décision (Vincke, 1989).

Une démarche d'aide multicritère à la décision consiste à comparer différentes actions (projets, plans, stratégies, variantes, programmes, options, modalités) sur la base de plusieurs critères (indicateurs, attributs) définis par le décideur. Ce dernier doit également établir ses préférences, c'est-à-dire le poids qu'auront les critères dans le processus décisionnel ainsi que ses seuils de préférences, d'indifférence et de *veto*. Par la suite, les actions sont évaluées selon chacun des critères pour former une matrice d'évaluation des performances (Vincke, 1989). Finalement, une procédure d'agrégation multicritère est utilisée, quoiqu'elle ne soit pas strictement nécessaire. Toutefois, la complexité du problème peut conduire à utiliser une méthode d'agrégation ou à en développer une appropriée, si elle n'existe pas.

### 3. Méthodologie

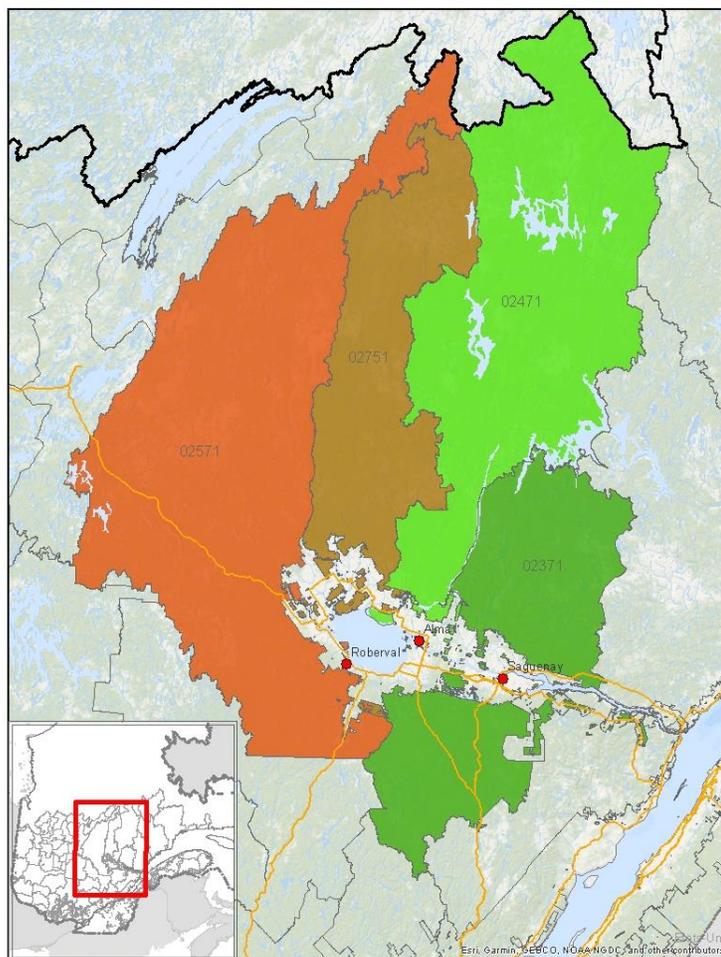
Aux sections suivantes sont présentées les informations et les méthodes utilisées dans le contexte du projet. Le nom donné au modèle développé dans le cadre du projet est BFEC-CC.

#### 3.1. Zone d'étude et données forestières

##### 3.1.1. Description de la zone d'étude

Pour tester l'approche développée et le modèle, une région d'étude a été déterminée. L'équipe du projet s'est arrêtée sur la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean qui est située au cœur de la forêt boréale québécoise (Figure 4). Cette région a été choisie en raison de la conjonction d'enjeux liés à la forêt, en particulier : l'importance de la forêt au niveau social et économique, ses multiples usages et la vulnérabilité de la région face aux changements climatiques. En effet, des travaux de recherche récents suggèrent que la région risque d'en être fortement affectée (Gauthier et coll., 2015). De plus, les instances régionales responsables de la mise en œuvre de la stratégie d'aménagement forestier sont conscientes des enjeux climatiques auxquels elles font face et sont en réflexion sur les mesures d'adaptation envisageables (Direction de la gestion des forêts du Saguenay–Lac-Saint-Jean, 2018).





**Figure 4. Localisation de la région à l'étude, la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean.**

La région du Saguenay–Lac-Saint-Jean couvre un vaste territoire allant de la Réserve faunique des Laurentides au sud jusqu'à la limite territoriale des forêts attribuables au nord. La Figure 4 présente la localisation de la région et les quatre unités d'aménagement qui la composent, soit les unités d'aménagement 023-71, 024-71, 025-71 et 027-51. Le territoire forestier retenu pour l'étude s'étend sur plus de 68 076 kilomètres carrés, dont 60 703 kilomètres carrés sont aménagés. Les superficies sont présentées pour chacune des unités d'aménagement au Tableau 1. Du nord au sud, le territoire public recouvre trois domaines bioclimatiques : la pessière à mousses, la sapinière à bouleau blanc et la sapinière à bouleau jaune. Le régime de perturbations naturelles est caractérisé par les feux et les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette.

**Tableau 1. Superficie forestière productive et superficie aménagée dans les unités d'aménagement de la région à l'étude**

Unités d'aménagement	Superficie forestière productive (ha)	Superficie aménagée (ha)
023-71	1 257 060	1 115 923
024-71	1 885 503	1 615 100
025-71	2 630 737	2 428 822
027-51	1 034 352	910 500
Total	6 807 652	6 070 345

La région du Saguenay–Lac-Saint-Jean est une région forestière importante au Québec. En effet, c'est la région où les possibilités forestières sont les plus élevées. Elle compte 32 bénéficiaires de garanties d'approvisionnement qui se partagent plus de cinq millions de mètres cubes de bois. En 2013, la récolte forestière était le secteur de l'industrie forestière employant le plus de personnes (2 388), suivie de près par l'industrie de la première transformation (2 304). Finalement, il y avait 1 306 personnes employées par les industries de 2<sup>e</sup> et de 3<sup>e</sup> transformation (Direction de la gestion des forêts du Saguenay–Lac-Saint-Jean, 2018). Plus de 400 entreprises sont répertoriées dans la filière forestière qui génère annuellement environ 1,9 milliard de dollars en valeur de production (Direction de la gestion des forêts du Saguenay–Lac-Saint-Jean, 2018).

Depuis 2000, la région a connu une baisse des possibilités forestières de 24 %. Ces baisses sont attribuables à plusieurs facteurs selon l'unité d'aménagement. À la suite de la Commission Coulombe en 2005, les possibilités forestières du groupe SEPM (sapin, épinettes, pin gris et mélèzes) ont été réduites de 20 % sur l'ensemble du territoire. Depuis la création de la fonction de Forestier en chef, le calcul et la détermination des possibilités forestières intègrent plusieurs nouvelles considérations, notamment pour la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique. Ces éléments ont contribué à confirmer cette baisse (Direction de la gestion des forêts du Saguenay–Lac-Saint-Jean, 2018).

L'accès au territoire est un élément important dans l'aménagement forestier de la région étant donné la grande quantité d'acteurs diversifiés présents. Plusieurs communautés autochtones sont présentes en plus des villégiateurs, chasseurs, trappeurs et autres utilisateurs de la forêt. Certaines portions du territoire sont dédiées à diverses protections administratives, notamment pour le caribou forestier qui occupe une partie importante de la région. L'harmonisation des usages et la protection du territoire sont des enjeux importants qui viennent influencer l'aménagement forestier. Ces éléments sont pris en compte dans la planification opérationnelle et tactique, mais aussi à l'échelle stratégique dans le calcul des possibilités. Le Tableau 2 présente les possibilités forestières déterminées pour la période 2018-2023 pour la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean. Les possibilités forestières en vigueur sont de 7 216 700 m<sup>3</sup> bruts par année.

**Tableau 2. Possibilités forestières de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean**

Unités d'aménagement	Possibilités forestières 2018-2023 en volume marchand brut (m <sup>3</sup> /an)									
	SEPM	Thuya	Pruche	Pins blanc et rouge	Peupliers	Bouleau à papier	Bouleau jaune	Érables à sucre et rouge	Autres feuillus durs	Total
023-71	1 160 700	200	0	900	141 600	186 500	37 600	9 200	900	1 537 600
024-71	1 307 200	0	0	400	49 200	172 100	10 100	3 600	0	1 542 600
025-71	2 398 400	0	0	0	337 800	323 900	4 600	4 900	100	3 069 700
027-51	881 400	0	0	100	73 500	108 900	1 200	1 500	200	1 066 800
<b>Total</b>	<b>5 747 700</b>	<b>200</b>	<b>0</b>	<b>1 400</b>	<b>602 100</b>	<b>791 400</b>	<b>53 500</b>	<b>19 200</b>	<b>1 200</b>	<b>7 216 700</b>

### 3.1.2. Stratégie d'aménagement

La stratégie d'aménagement appliquée à la modélisation dans le contexte du présent projet a été simplifiée pour les besoins de l'étude. Trois traitements ont été retenus soit la coupe totale, l'éclaircie précommerciale et la plantation. La coupe de récupération fait aussi partie des traitements sylvicoles disponibles et est une variante de la coupe totale lorsque le bois doit être récupéré après un feu. La rétention d'arbres individuels ou de groupes d'arbres est de 2 % pour la coupe totale. Pour les traitements d'éclaircie précommerciale et de plantation, les cibles de superficies à atteindre appliquées dans le modèle proviennent de la stratégie utilisée dans le calcul des possibilités forestières pour les unités d'aménagement de la région. Des cibles annuelles ont alors été fixées pour les plantations à 20 086 hectares et à 3 936 hectares pour l'éclaircie précommerciale réparties dans les quatre unités d'aménagement en fonction de la stratégie de chacune.

Un objectif en lien avec le pourcentage de vieilles forêts a aussi été intégré au modèle. Un pourcentage de vieilles



forêts doit être maintenu par unité territoriale d'analyse. Le maintien d'une structure d'âge se rapprochant des paysages naturels dans les peuplements forestiers est un enjeu d'aménagement écosystémique qui est intégré au calcul des possibilités forestières sous forme de contrainte. Cet objectif consiste à « ... maintenir une forêt dont la structure d'âge se situe dans les limites de la variabilité naturelle » (Bureau du forestier en chef, 2018b). La méthode utilisée dans le projet pour calculer le taux de vieilles forêts et les seuils définis est basée sur les méthodes utilisées pour le calcul des possibilités forestières (Bureau du forestier en chef, 2018b).

### 3.1.3. Strates d'aménagement et évolution

Dans le cadre du calcul des possibilités forestières, les strates d'aménagement sont des regroupements de peuplements écoforestiers (Bureau du forestier en chef, 2018b). Pour les besoins du projet, les strates ont été regroupées une deuxième fois, principalement afin d'uniformiser l'information et aussi pour éviter les dédoublements. Le regroupement s'est fait sur la base de trois critères, soit les scénarios sylvicoles auxquels la strate était admissible, le milieu physique, qui ici est un regroupement de la végétation potentielle et le type de forêt. Les deux premiers critères ont été utilisés pour classer les peuplements selon les différentes combinaisons possibles de scénarios sylvicoles et de milieux physiques. Par la suite, à l'intérieur des groupes créés, les strates ont été regroupées selon les proportions d'essences présentes dans chacune des courbes d'évolution qui leur étaient associées dans les modèles de croissance. À cette étape, chaque strate utilisée au calcul des possibilités forestières fait partie d'un regroupement. Ces regroupements de strates deviendront les strates utilisées dans le modèle BFEC-CC suite à un dernier regroupement des courbes d'évolution.

Chaque strate d'aménagement dans le modèle possède sa propre courbe d'évolution avec une proportion d'essences résineuses et feuillues correspondante. Pour y arriver, des courbes d'évolution représentant les quartiles inférieur, médian et supérieur de l'ensemble des courbes d'évolution initialement créées pour le calcul des possibilités forestières (Bureau du forestier en chef, 2018a) associées à chaque regroupement de strates d'aménagement produit précédemment ont été générés à l'aide d'une régression quantile. Ces courbes ont été produites par groupe d'essences (sapin baumier [SAB], feuillus intolérants [F<sub>i</sub>], feuillus tolérants [F<sub>t</sub>], résineux intolérants [R<sub>i</sub>] et résineux tolérants [R<sub>t</sub>]) provenant du modèle de croissance forestière Natura (Auger, 2017). Il existe donc pour chaque regroupement de strates trois courbes d'évolution (inférieure, médiane et supérieure). Pour n'avoir qu'une seule courbe par strate, les peuplements à l'intérieur de chaque regroupement de strates ont été classés selon le quartile se rapprochant le plus de leur patron de courbe. Donc, chaque regroupement de strates produit a été divisé en trois selon l'association des patrons de courbes des peuplements leur appartenant en fonction de leurs courbes d'évolution (inférieure, médiane et supérieure) correspondantes. Finalement, cette dernière division devient la strate utilisée dans le modèle BFEC-CC et les courbes correspondantes générées à l'aide de la régression quantile ont été utilisées pour l'évolution des strates dans les modèles. Il est à noter que les courbes d'évolution utilisées dans le modèle prennent en compte implicitement les délais de régénération. Dans la région d'étude, ces délais sont principalement dus à la présence d'éricacées.

Étant donné qu'il n'y a qu'une seule courbe d'évolution associée à chaque strate, l'effet des traitements sylvicoles (section 3.1.3) se traduit dans le modèle par une transition vers une nouvelle strate. Pour chaque strate produite, la courbe d'effet de traitement est une moyenne pondérée des courbes d'effets de traitement issues du calcul des possibilités forestières. La pondération est en fonction de la superficie associée aux courbes (Bureau du forestier en chef, 2018a). Donc, pour chaque strate dans le modèle, une strate de transition a été produite en fonction des effets de traitement où la courbe d'évolution est une moyenne de courbes utilisées au calcul des possibilités forestières. Les quatre modèles servant à la détermination des possibilités forestières, dans l'ensemble, comptent plus de 3 600 strates. Le regroupement a permis de diminuer le nombre de strates à 207.

### 3.1.4. Données présentes dans le modèle BFEC-CC

Plusieurs données sous forme de tableaux servent à alimenter le modèle. Elles sont présentées au Tableau 3.

**Tableau 3. Données tabulaires utilisées dans le modèle et sources respectives**

Données	Sources
<b>Volume marchand résineux et feuillu par strate d'aménagement</b>	Provient des regroupements de strates présentés à la section 3.1.3.
<b>Transitions suite à une action du modèle</b>	Est basé sur les transitions utilisées dans le calcul des possibilités forestières pour les actions retenues (section 3.1.3).
<b>Superficie maximale en éclaircie précommerciale</b>	Cibles par unité d'aménagement selon la stratégie du calcul des possibilités forestières
<b>Superficie maximale en plantation</b>	Cibles par unité d'aménagement selon la stratégie du calcul des possibilités forestières
<b>Superficie minimale devant être conservée en vieilles forêts par UTA</b>	Provient du calcul de seuil des vieilles forêts pour les UTA concernées dans le modèle.
<b>Âge d'éligibilité des strates pour la récolte</b>	Provient des courbes d'évolution (section 3.1.3)

Les intrants spatiaux utilisés pour le modèle sont sous format matriciel. Les données proviennent de couches vectorielles utilisées pour le calcul des possibilités forestières qui ont été transformées en format matriciel à une échelle de 14,44 hectares. La liste suivante présente les différentes couches matricielles nécessaires au modèle :

- unité d'aménagement
- territoire couvrant la forêt aménagée
- territoire couvrant la forêt non aménagée
- territoire non forestier selon leur type
- âge
- strate d'aménagement
- présence et classes de chemin
- sous-domaines bioclimatiques
- unités territoriales d'analyse (UTA).

## 3.2. Modélisation des changements climatiques

### 3.2.1. Information climatique

Dans le contexte du projet, trois scénarios climatiques (section 2.2.1) et des données climatiques provenant de trois modèles de système terrestre (ESM, section 2.2.2) ont été utilisés.

Les scénarios utilisés dans le contexte du projet sont les suivants :

- Historique : le climat de référence pour la période 1980-2010
- RCP 4.5 : un scénario climatique modéré, correspondant à une augmentation de la température moyenne annuelle de 1,6 à 4,2°C pour la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean pour la période 2071-2100<sup>10</sup>
- RCP 8.5 : un scénario climatique plus sévère, correspondant à une augmentation de la température moyenne annuelle de 3,8 à 7,1°C pour la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean pour la période 2071-2100<sup>10</sup>.

Pour l'ensemble des travaux de ce projet, les conditions climatiques prédites pour la période 2071 à 2100 sont maintenues jusqu'à la fin de la simulation, en 2170. Cette application des données climatiques a été nécessaire parce que la période de simulation du projet (150 ans) est plus longue que la période pour laquelle des données climatiques sont disponibles (80 ans, de 2020 à 2100).

<sup>10</sup> <https://www.ouranos.ca/portraits-climatiques/#/regions/30>.



Les données climatiques utilisées dans le cadre du projet proviennent de trois modèles climatiques (ESM) :

- CanESM2 : Canadian Earth System Model, version 2
- MIROC-ESM-CHEM : Model for Interdisciplinary Research – Earth System Model
- HadGEM2-ES : Hadley Global Environment Model 2 - Earth System.

Les données climatiques historiques utilisées dans le cadre du projet ont été simulées par le modèle CanESM2, dans le but d’assurer un haut degré de conformité avec les données sous changements climatiques. Dans le but d’établir une cohérence parmi les différents processus modélisés sous changements climatiques, les mêmes combinaisons de scénarios climatiques / ESM (Tableau 4) ont alimenté à la fois :

- la simulation des feux par Boulanger et coll. (2017)
- la simulation de la productivité des peuplements forestiers (Power et Auger, 2019)
- les températures moyennes annuelles pour la tordeuse des bourgeons de l’épinette (section 2.3.2).

**Tableau 4. Combinaisons d’ESM et de scénarios climatiques utilisés dans le cadre du projet**

Scénarios climatiques	Modèles climatiques (ESM)		
	CanESM2	MIROC-ESM-CHEM	HadGEM2-ES
Historique	☑		
RCP 4.5	☑	☑	☑
RCP 8.5	☑	☑	☑

### 3.2.2. Structure de la modélisation

L’outil de modélisation utilisé dans le contexte du projet est SELES (Fall et Fall, 2001). Cet outil permet l’intégration de processus stochastiques et un suivi de l’information spatiale sous forme matricielle. L’absence de délimitations par polygones permet plus de flexibilité quant à l’application de nouvelles perturbations dans le modèle. Le pas de temps appliqué dans le modèle est d’une année.

Lors de la conception du modèle de simulation, le climat est considéré comme faisant partie du contexte de la modélisation (Figure 3), et donc aucun processus climatique n’est modélisé explicitement au sein du modèle BFEC-CC.

Deux processus sont considérés comme faisant partie des processus sous-jacents (Figure 3) au modèle de simulation et sont intégrés au modèle BFEC-CC sous forme d’intrants, produits par d’autres modèles qui eux sont externes au processus de modélisation développé dans le contexte de ce projet; il s’agit donc de couplages faibles (section 2.4.1) :

- 1) L’effet du climat sur la productivité forestière : L’effet des changements climatiques sur la productivité forestière a été intégré au projet à l’aide des résultats de modélisation d’une étude parallèle au projet (Power et Auger, 2019; section 2.3.3).
- 2) L’effet du climat sur les feux de forêt : Les résultats de modélisation issus des études de Boulanger et coll. (2014 et 2017) ont été intégrés au projet (section 2.3.1).

### 3.2.3. Incertitude intégrée à l’exercice de modélisation

Il existe dans le monde naturel un très grand nombre de sources d’incertitudes (section 2.5). De ces dernières, la principale prise en compte dans le projet est celle liée au climat, mais il aurait été possible d’en intégrer davantage. Ainsi, trois scénarios climatiques ont été intégrés aux simulations dans le cadre de ce projet. Les méthodes d’aide à la décision (section 3.3.2) ont donc dû intégrer cette incertitude dans la synthèse et la présentation des résultats.

### 3.2.4. Processus modélisés

Les différents processus modélisés par l'outil BFEC-CC sont présentés au Tableau 5. Les processus clés sont décrits aux sous-sections suivantes.

**Tableau 5. Processus modélisés, la portion de l'aire d'étude sur laquelle ils agissent et leurs fonctions principales**

Ordre d'exécution	Module	Localisation	Effets principaux
1	Feux	Forêt	Perturbation d'origine <sup>11</sup>
2	Mortalité sévère due à la tordeuse	Forêt	Perturbation d'origine <sup>11</sup>
3	Habitat du caribou forestier	Toute la région	Mise à jour de la superficie perturbée et identification de l'habitat
4	Disponibilité du territoire à l'aménagement	Forêt aménagée	Évaluation des contraintes à l'aménagement
5	Évaluation du stock sur pied	Forêt	Mise à jour du volume marchand; effet des changements climatiques sur le volume; établissement de la cible de récolte
6	Coupe de récupération	Forêt contenant du volume récupérable	Récupération des bois brûlés
7	Récolte de bois vivant	Forêt aménagée éligible pour la récolte	Récolte par coupe totale
8	Régénération	Forêt perturbée	Régénération naturelle ou évaluation de l'éligibilité à la plantation et autres traitements
9	Plantation	Forêt aménagée éligible pour la plantation	Planté ou non, initiation sur une nouvelle strate, éligibilité aux traitements
10	Zones d'aménagement intensif	Zones désignées pour l'aménagement intensif	Plantation en zone d'aménagement intensif
11	Éclaircie précommerciale	Forêt aménagée éligible à l'éclaircie précommerciale	Éclaircie, assignation à nouvelle strate
12	Gestion des chemins	Toute la région	Activer ou désactiver les chemins en fonction de temps depuis la récolte dans les peuplements avoisinants
13	Succession végétale	Forêt	Augmentation de l'âge par le pas de temps

#### 3.2.4.1. Feux de forêt

Selon le modèle utilisé, les feux sont appelés à devenir encore plus importants en forêt boréale sous l'effet des changements climatiques (section 2.3.1). Il était donc essentiel d'inclure ce phénomène parmi les processus à modéliser. Le comportement du processus de feu est présenté dans les sections suivantes.

<sup>11</sup> Une perturbation d'origine réinitialise l'âge du peuplement à zéro.



## Initiation des feux

L'occurrence historique des feux de forêt dans l'aire d'étude n'est pas uniforme. En effet, la répartition des superficies brûlées dans la région entre 1920 et 2017<sup>12</sup> montre une concentration des feux aux extrémités nord et ouest du territoire. Pour créer une surface qui conditionne la probabilité d'initiation des feux dans le modèle en fonction de l'historique des feux, une fenêtre mobile d'un rayon de 100 kilomètres a été superposée à la carte de la fréquence historique des feux et la fréquence moyenne des feux a été inscrite au centre de cette fenêtre mobile. Ainsi, une surface lissée a été créée et incluse dans le modèle pour informer l'initiation des feux (Figure 5).

De plus, les feux peuvent être initiés uniquement dans les cellules du modèle en forêt qui n'ont pas brûlé dans l'année en cours de modélisation.

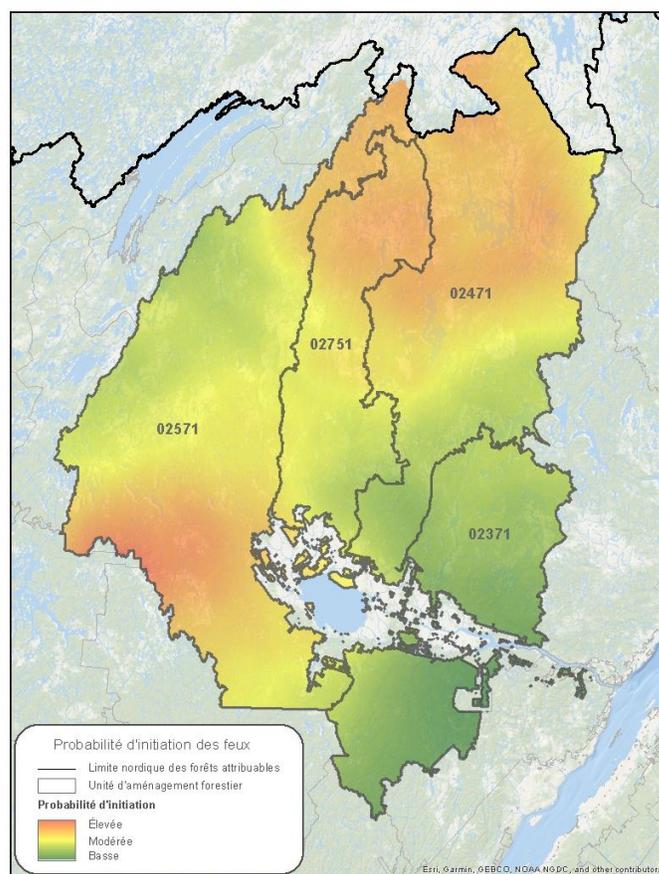


Figure 5. Probabilités d'initiation des feux dans le paysage.

## Superficie brûlée

La superficie à brûler annuellement par le modèle sous les différents scénarios climatiques a été fournie par le Service canadien des forêts (Boulanger, comm. pers.). Cette superficie à brûler annuellement a été estimée à l'aide de l'outil de modélisation décrit dans Boulanger et coll. (2014 et 2017), qui a été mis à jour avec les données climatiques utilisées dans le cadre de ce projet (section 2.2). La zone d'étude se situe entièrement dans la zone HFR Eastern James Bay (Boulanger et coll., 2013), à l'exception de quelques hectares à l'extrémité est de la région. Les données de feu de cette zone homogène ont donc été utilisées pour l'ensemble de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean.

Les données de feux ont été appliquées par période de 30 ans (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Après 2100,

<sup>12</sup> Les données proviennent du jeu de données sur les Feux de forêts produit par la Direction des inventaires forestiers et Direction de la protection des forêts. Disponible à : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/feux-de-foret>.

les conditions sont considérées comme étant équivalentes à celles de 2071-2100. Pour compléter la série temporelle des feux futurs, la période 2071-2100 a été échantillonnée aussi souvent que nécessaire pour compléter la série temporelle (c'est-à-dire jusqu'en 2170). Une centaine de réalisations<sup>13</sup> de régime de feu a été fournie, mais seule la réalisation médiane, par scénario climatique et ESM, a été appliquée dans le contexte du projet.

Suivant la méthodologie décrite dans les annexes de Bernier et coll. (2016), l'effet de la composition initiale de la forêt sur le taux de brûlage a été retiré des superficies à brûler annuellement de Boulanger (en appliquant un facteur de correction de 1,64; Boulanger et coll., 2017). L'effet de la composition est par la suite réinséré dans les données de superficie pouvant être brûlée annuellement par le modèle lors de chaque année de simulation (section 2.3.1.3).

### Événements de feux

Les tailles des événements de feux proviennent de la Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada (BNDFFC). Dans le but de reproduire la distribution des tailles des feux historiques de la région, seuls les feux historiques de la région ont été inclus. Deux cent cinquante séquences de tailles de feux ont été construites en échantillonnant de façon aléatoire l'historique des tailles de feu pour la région. Ces événements de feux sont lus par le modèle au courant d'une année de simulation, de façon séquentielle, jusqu'à ce que la cible de superficie à brûler annuellement soit atteinte.

**Tableau 6. Les tailles (en hectares) des 20 premiers événements de feux (en rangée) pour les 10 premières réalisations de tailles de feu (en colonne) pour la région**

Index	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10
1	3045	23673	1657	15701	11312	2270	68426	11312	9858	6585
2	47581	1762	2514	2270	2359	68426	368	47581	368	1389
3	1657	23198	68426	2359	1762	15701	2270	9858	6585	322
4	9858	68426	2514	2514	2075	961	1762	1670	368	287
5	755	9858	2359	368	1670	47581	3045	68426	6585	47581
6	755	15701	368	2514	3109	1657	4165	2359	1670	1657
7	322	3109	473	2359	961	3109	23198	3045	68426	3045
8	4165	1389	473	15701	1670	1670	473	11312	23673	322
9	1762	287	1762	2514	322	47581	6585	2359	2270	6585
10	473	68426	961	1670	1657	3045	68426	11312	755	961
11	1670	287	3109	6585	1657	473	473	23673	23198	23673
12	9858	15701	23198	4165	15701	23198	755	1762	287	2359
13	47581	68426	6585	2514	15701	1762	47581	9858	2514	3045
14	2075	11312	23673	368	68426	1389	287	6585	23673	47581
15	1657	961	23673	368	23673	473	1762	287	1762	2075
16	368	9858	11312	1657	375	2075	375	322	4165	4165
17	2359	6585	2075	473	6585	322	47581	1389	11312	1389
18	2359	2075	3045	2270	1389	47581	375	473	1389	68426
19	1389	375	47581	68426	375	11312	961	3045	11312	23198
20	961	1389	6585	4165	2359	23673	68426	322	6585	2270

<sup>13</sup> Dans ce contexte, une réalisation est un des possibles futurs calendriers de superficie à brûler annuellement par le modèle. Les réalisations sont tirées d'une population de réalisations de régime de feu, cette population possédant une moyenne et un écart type de superficie brûlée annuellement.



## Correction pour la composition du paysage

Pour corriger la superficie à brûler annuellement en fonction de la composition du paysage modélisé par l'outil BFEC-CC, la correction décrite dans les annexes de Bernier et coll. (2016) est appliquée par le modèle. Ainsi, à chaque année de simulation, un facteur de correction moyen est calculé pour l'ensemble de la forêt modélisée. Ensuite, ce facteur de correction est appliqué à la superficie à brûler dans l'année. Une fois le facteur de correction appliqué selon les paramètres proposés par Bernier et coll. (2016), plus un paysage est composé de peuplements jeunes et feuillus, plus le taux de brûlage est faible et, inversement, plus le paysage est composé de peuplements vieux et résineux, plus le taux de brûlage sera élevé.

**Tableau 7. Facteurs de sélection des feux servant au calcul de la correction de la superficie à brûler annuellement en fonction de la composition, selon Bernier et coll. (2016)**

Ratios de sélection	Classes d'âge		
	0-30	31-90	91+
Résineux	0,8	2	2,9
Résineux mixte	0,43	1,16	1,79
Feuille mixte	0,22	0,57	0,96
Feuille	0,15	0,4	0,63

La méthode de Bernier et coll. (2016) a été modifiée pour mieux prendre en compte l'abondance de superficies en régénération et en échec de régénération. Dans les travaux de Bernier et coll. (2016), seulement trois classes d'âge sont utilisées (0-30, 31-90 et 91 ans et plus (Tableau 7). Les travaux d'Erni et coll. (2018) ont servi à la construction de paramètres donnant plus de résolution au facteur de sélection de Bernier et coll. (2016) en fonction de l'âge pour les peuplements jeunes (Tableau 8). Les facteurs de sélection ont été définis de sorte à maintenir une bonne correspondance entre les classes de Bernier et coll. (2016) et celle appliquée dans le cadre du projet. Par exemple, les valeurs pour les classes 31-90 et 91 et plus n'ont pas été modifiées. Aussi, la valeur moyenne des facteurs de sélection des classes 0-30, pondérée par le nombre d'années auxquelles elle s'applique, correspond de près à la valeur proposée par Bernier et coll. (2016) pour la même classe de composition (feuillue, mixte feuillue, mixte résineuse ou résineuse).

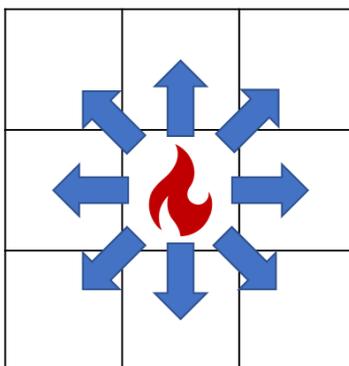
**Tableau 8. Facteur de sélection des feux mis à jour aux fins de projet. Une classe d'âge correspondant à un âge de 0 a été incluse pour mieux tenir compte des échecs de régénération dans la correction de la superficie à brûler annuellement**

Ratios de sélection	Classes d'âge						
	0	1-5	6-10	11-15	16-30	31-90	91+
Résineux	0	0,1	0,63	0,9	1,1	2	2,9
Résineux mixte	0	0,05	0,25	0,4	0,65	1,16	1,79
Feuille mixte	0	0,02	0,1	0,2	0,34	0,57	0,96
Feuille	0	0,01	0,07	0,13	0,25	0,4	0,63

## Propagation des feux

La propagation du feu d'une cellule en feu vers ses cellules voisines (Figure 6) est sujette à un certain nombre de contraintes. Pour qu'un feu s'y propage, une cellule doit être une forêt et doit avoir été perturbée depuis au moins un an (c'est-à-dire qu'un feu ne peut pas brûler la même cellule deux fois dans la même année). Aussi, pour chaque événement de propagation de feu d'une cellule en feu à ses cellules voisines, le nombre de cellules vers lesquelles le feu peut se propager est tiré d'une distribution normale ayant une moyenne de 1 et un écart type de 0,3. Ce nombre de cellules récipiendaires doit obligatoirement se situer entre 1 et 6. Ces paramètres de propagation, qui n'ont pas d'incidence sur la superficie brûlée au cours d'une année, ont été déterminés de sorte à créer une certaine complexité aux contours des événements de feu. La probabilité de propagation vers une

cellule voisine dépend de sa composition et de sa structure d'âge telles que pondérées à l'aide du facteur de sélection de Bernier et coll. (2016).



**Figure 6. Illustration d'une cellule en feu, au centre, qui tente de se propager à chacune de ses huit voisines.**

Lorsque la cible de superficie à brûler annuellement est atteinte, toute propagation des feux est arrêtée. De cette façon, la cible annuelle n'est jamais excédée.

### **Effet des feux sur la forêt**

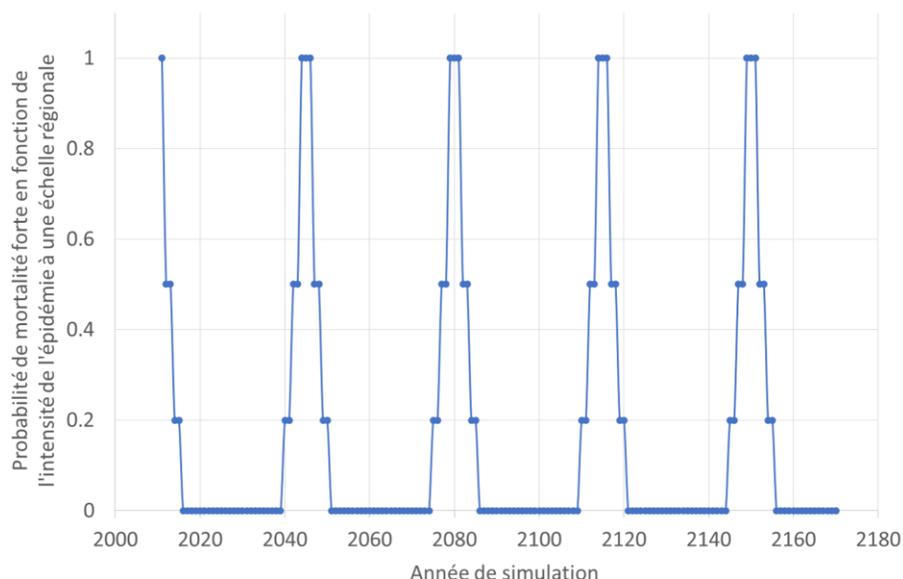
Dans la réalité, l'effet des feux sur l'état de la forêt est très complexe, modifiant un très grand nombre de caractéristiques, telles la réduction de la couche organique, l'abondance de propagules et la quantité de bois récupérable. Dans le contexte du présent projet, l'effet des feux est très simple : les feux rétablissent toujours l'âge des peuplements à zéro. Suite au passage du feu, le modèle note que les cellules atteintes nécessitent une évaluation du potentiel de régénération (section 3.2.4.4). En absence d'échec de régénération, la transition d'une cellule après feu est la même qu'après une coupe totale, telle que définie par la stratégie d'aménagement (section 3.1.2).

Le volume récupérable est évalué après feu. Les hypothèses retenues pour le projet sont à l'effet que, si le peuplement est âgé de moins de 50 ans au moment du feu, aucun volume n'est récupérable après feu. Pour les peuplements de 50 à 80 ans, seulement 50 % du volume marchand avant feu est disponible après feu. Cette proportion passe à 70 % pour les peuplements de plus de 80 ans. Ce volume récupérable devient indisponible à la fin de la deuxième année après le passage du feu, en raison de la dégradation des bois causée principalement par les insectes xylophages et l'assèchement du bois d'aubier (Nappi et coll., 2011).

#### **3.2.4.2. Tordeuse des bourgeons de l'épinette**

Le comportement du module de la tordeuse des bourgeons de l'épinette est basé sur la méthodologie présentée dans Bouchard et coll. (2015) et aussi sur des recommandations faites par l'auteur principal de cet ouvrage quant à (i) l'effet des changements climatiques sur la tordeuse et (ii) l'adaptation de la méthodologie aux fins du projet.





**Figure 7. Probabilité de mortalité forte au sein d'une cellule en fonction de la sévérité des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette à l'échelle régionale.**

Le module évalue, pour l'ensemble de la superficie en forêt, la probabilité que la tordeuse engendre une mortalité forte au sein d'un peuplement basée sur chacune des caractéristiques suivantes :

- la composition du peuplement (Tableau 9)
- l'âge du peuplement (Tableau 10)
- l'intensité de l'épidémie à une échelle provinciale (Figure 7) et
- la température moyenne annuelle en vigueur dans l'année de l'évaluation.

Pour y arriver, le modèle multiplie les probabilités associées à chacune de ces caractéristiques (toutes entre 0 et 1), et compare cette probabilité à une valeur entre 0 et 1 tirée aléatoirement d'une distribution uniforme lors de chaque évaluation. Si la probabilité calculée est plus grande que la valeur aléatoire, alors il y a défoliation sévère dans la cellule. Donc, si une probabilité est égale à zéro (par exemple, le peuplement est en feuillus intolérants (Tableau 10) pour un peuplement donné, il n'y a alors aucune possibilité qu'il y ait mortalité sévère due à la tordeuse. Inversement, si toutes les caractéristiques sont favorables à l'insecte, la probabilité d'une défoliation sévère est très forte.

Pour la modélisation dans le contexte du présent projet, l'intervalle entre les épidémies de la tordeuse est de 35 ans (Figure 7). La probabilité de mortalité forte au sein d'une cellule en fonction de l'intensité de l'épidémie à l'échelle régionale varie entre 0 et 1 (Figure 7). Les probabilités associées à l'âge et à la composition des peuplements sont présentées au Tableau 9 et au Tableau 10 respectivement. Dans ce contexte de vulnérabilité à la tordeuse, l'essence (ou le groupe d'essences) identifiée comme étant dominante (Tableau 10) est celle qui détient le volume marchand le plus important au sein du peuplement. Les probabilités associées à la température moyenne annuelle sont présentées au Tableau 11. Ces températures moyennes annuelles sont lues par unité territoriale d'analyse, en fonction du scénario climatique et de l'ESM en vigueur lors de la simulation (section 3.2.1). Ces séries temporelles de températures moyennes annuelles ont été téléchargées des bases de données d'Ouranos en format NetCDF pour les centroïdes de chaque unité territoriale d'analyse dans la région à l'étude.

**Tableau 9. Probabilité de défoliation sévère en fonction de l'âge du peuplement**

Classes d'âge	Probabilité de défoliation sévère
0 à 30 ans	0
31 à 60 ans	0,5
60 ans et plus	1

**Tableau 10. Probabilité de défoliation sévère en fonction de l'essence, ou du groupe d'essences, qui domine le peuplement**

Composition	Probabilité de défoliation sévère
Sapin baumier	0,5
Épinette noire	0,2
Pin gris	0
Feuillus tolérants	0
Feuillus intolérants	0

**Tableau 11. Probabilité d'une mortalité sévère due à la tordeuse associée à la température moyenne annuelle**

Borne inférieure (°C)	Borne supérieure (°C)	Probabilité associée à la température
-273	-1	0
-1	0	0,5
0	2	1
2	3	0,5
3	∞	0

### 3.2.4.3. Croissance de la forêt

Power et Auger (2019) ont modifié le modèle Artémis 2014 (Power, 2016) pour simuler l'effet des changements climatiques sur l'évolution du volume marchand des strates d'aménagement (section 3.1.3) utilisées dans le cadre de ce projet. Ce modèle, basé sur Artémis-2014 (Power, 2016), simule l'accroissement en diamètre, la mortalité et le recrutement des tiges d'un peuplement sur une gamme importante de végétation potentielle (MFFP, 2015). La sensibilité au climat du modèle de Power et Auger (2019) est le résultat (i) de l'intégration du modèle de D'Orangeville et coll. (2018), qui simule les accroissements en surface terrière de plusieurs essences en fonction de la température et des précipitations et (ii) de l'utilisation de ces deux variables (température et précipitations) dans le module de mortalité de certaines végétations potentielles.

Avec ce nouveau modèle, Power et Auger (2019) ont simulé sur 150 ans l'évolution des placettes-échantillons de la région sous un climat historique, puis sous les différentes combinaisons de scénarios climatiques et ESM (Tableau 4). Puisque le stade de développement d'un peuplement influence sa réponse au signal climatique, les simulations ont été montées de sorte à simuler les différents stades de développement sur l'ensemble des périodes climatiques (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100). Ces simulations intègrent donc l'effet du climat sur des peuplements établis de 1930 (âgés de 90 ans en 2020) à 2110 (peuplements établis par le modèle lors de la simulation). Après 2100, les conditions climatiques sont considérées constantes.



Par la suite, des ratios ont été calculés entre le volume par groupe d'essences ( $R_i$ ,  $R_t$ ,  $F_i$ ,  $F_t$  et SAB) sous changements climatiques (six combinaisons RCP/ESM, Tableau 4) et celui sous climat historique, par strate d'aménagement, classe d'âge de 20 ans et période de 5 ans. Ces ratios, les facteurs de correction de volume marchand sous changements climatiques, sont plus grands que 1 lorsque le volume marchand est supérieur sous changements climatiques comparativement au volume sous un climat historique et inférieur à 1 lorsqu'il est plus faible. Ce sont ces facteurs de correction qui ont été transférés au modèle BFEC-CC (ces modèles sont donc liés par couplage faible; section 2.4.1).

#### 3.2.4.4. Régénération des peuplements perturbés

Suite à une perturbation d'origine, par exemple le feu ou la coupe totale, le modèle BFEC-CC évalue comment le peuplement perturbé se régénérera. La méthode appliquée est basée sur les travaux de Splawinski et coll. (2019a).

Un diagramme illustrant le processus de régénération est présenté à la Figure 8. Suite à une coupe totale ou à une défoliation sévère, le peuplement perturbé est régénéré selon les transitions spécifiées au calcul des possibilités forestières; ces peuplements sont donc toujours régénérés. Suite à un feu, si le peuplement n'est pas à dominance de pin gris ou d'épinette noire, le peuplement est toujours régénéré à la même strate qu'avant la perturbation. Pour les peuplements à dominance de pin gris ou d'épinette noire, les règles énoncées dans Splawinski et coll. (2019a) s'appliquent. Suivant une perturbation d'origine au sein de ces peuplements, le modèle détermine si le peuplement avait atteint une maturité reproductive lors de la perturbation et donc s'il est capable de se régénérer par graines. Les valeurs pour l'âge à la maturité retenues sont de 30 ans pour le pin gris et 50 ans pour l'épinette noire. Lorsque le peuplement n'a pas atteint l'âge de maturité lors de la perturbation et qu'il n'y a pas dans le peuplement une composante feuillue importante (c'est-à-dire au moins 25 % du volume marchand en essences feuillues), alors le peuplement devient en échec de régénération. Par contre, s'il y a une composante feuillue importante dans le peuplement et la composante résineuse ne peut se régénérer, alors le peuplement se régénère en peuplement à dominance feuillue. À cette fin, trois strates à dominance feuillue ont été identifiées, chacune d'elles correspondant à des conditions édaphiques particulières. Cette correspondance a été obtenue en analysant la fréquence d'occurrence des peuplements feuillus par type de végétation potentielle (MFFP, 2015).



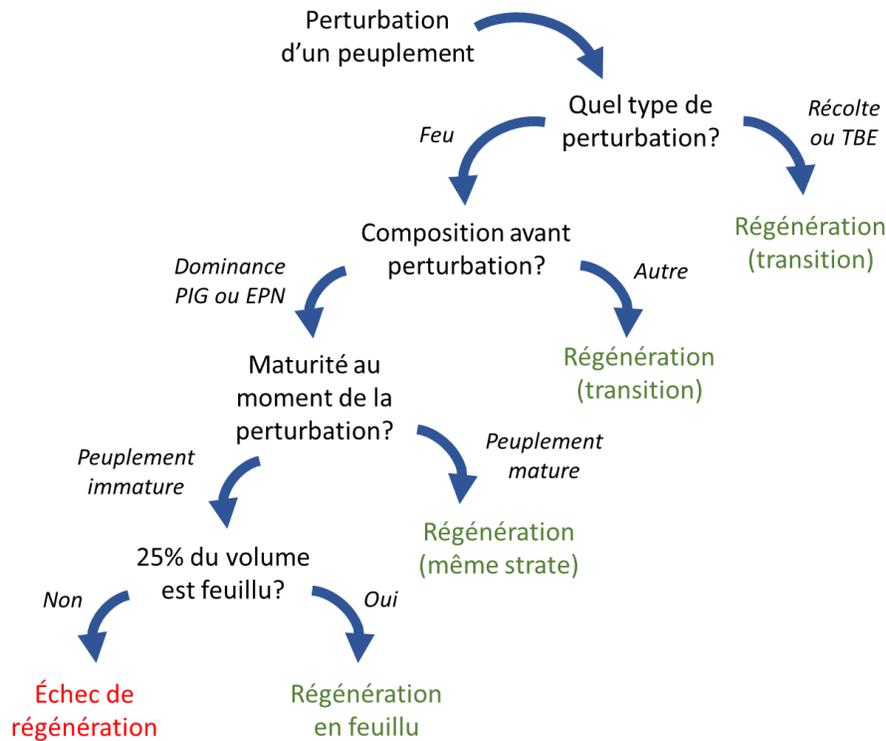


Figure 8. Illustration des règles décisionnelles qui mènent soit à la régénération du peuplement perturbé (en vert) ou à un échec de régénération (en rouge).

### 3.2.4.5. Récolte forestière et éclaircie précommerciale

Trois modules, représentant trois traitements sylvicoles distincts, prélèvent du volume ligneux en forêt : la coupe totale, la coupe de récupération et l'éclaircie précommerciale. Seules les coupes de récupération et les coupes totales génèrent du volume marchand qui est comptabilisé, séparément pour le résineux et le feuillu, pour l'atteinte de la cible de récolte (section 3.2.4.8). Lorsqu'un de ces trois traitements est appliqué à une cellule, celle-ci est identifiée comme ayant subi une perturbation anthropique aux fins de l'évaluation des taux de perturbation (section 3.2.4.9). De courtes descriptions de ces traitements sont présentées au Tableau 5.

La coupe de récupération permet au modèle de récolter la matière ligneuse dans des peuplements qui ont récemment brûlé. L'effet du feu sur le volume marchand est présenté à la section sur les feux (section 3.2.4.1). Quand les feux sont modélisés, le modèle cherche à combler sa cible de récolte en commençant par le volume récupérable. La coupe de récupération ne peut avoir lieu qu'en forêt aménagée.

Pour être éligible à la récolte par coupe totale, une cellule doit :

- être située en forêt aménagée
- avoir atteint l'âge minimum pour la récolte et
- lorsque la contrainte de vieilles forêts est en vigueur, être située dans une UTA où la proportion de vieilles forêts est supérieure à celle spécifiée par la contrainte.

Après la coupe de récupération, le module de récolte priorise les zones d'aménagement intensif (section 3.2.4.7). Après avoir récolté dans les zones d'aménagement intensif disponibles, le module priorise la récolte en commençant par les plus vieux peuplements disponibles.

Lorsqu'un peuplement a été perturbé, le modèle détermine si ce peuplement sera éligible, une fois l'âge minimum atteint (15 ans), à une éclaircie précommerciale. Chaque année, le modèle procède alors à l'éclaircie précommerciale des superficies éligibles jusqu'à ce que la superficie maximale définie à la stratégie d'aménagement en vigueur (section 3.1.2) soit atteinte.



### 3.2.4.6. Plantation

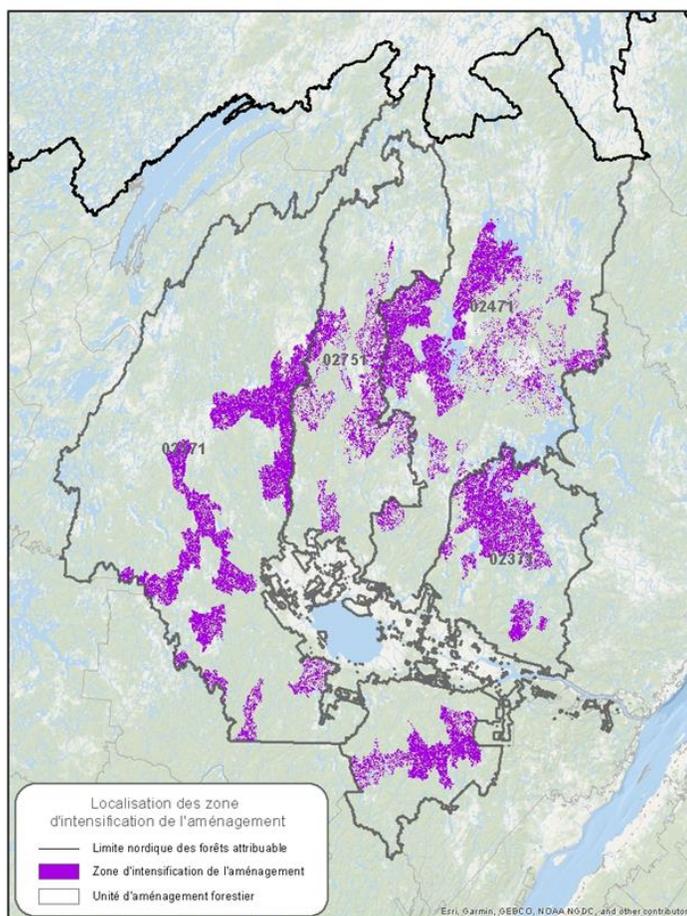
Deux situations peuvent amener le modèle à rétablir un peuplement par plantation :

- la récolte d'un peuplement pour lequel la plantation est une transition possible et
- un échec de régénération.

Le modèle établit ainsi des superficies en plantation jusqu'à ce que la limite annuelle de plantation, spécifiée par la stratégie d'aménagement (section 3.1.2), soit atteinte. Dans le contexte de ce projet, la plantation en zone d'aménagement intensif n'est pas contrainte par la limite de superficie à planter annuellement pour la balance du territoire aménagé.

### 3.2.4.7. Création de zones d'intensification de l'aménagement

Les zones d'intensification de l'aménagement ont été créées grâce à l'analyse des données disponibles dans le modèle. Les compartiments d'organisation spatiale ayant la plus grande proportion de leur superficie sur des stations productives ont été identifiés et classés conséquemment. Par la suite, les compartiments d'organisation spatiale ayant les plus grandes proportions de superficie sur des stations productives ont été retenus, jusqu'à ce qu'environ 25 % du territoire de la région soit intégré aux zones. Sur cette sélection, seules les strates étant admissibles à la plantation ont été retenues. Les zones ciblées sont présentées à la Figure 9.



**Figure 9. Localisation des zones d'aménagement intensif (en mauve). Ces zones représentent approximativement 25 % de la forêt aménagée.**

Dans ces zones, les cibles de plantations et de vieilles forêts ne sont pas appliquées. Ces zones sont considérées comme étant dédiées à la production de bois. Donc, lorsqu'il y a une perturbation naturelle ou anthropique qui ramène la cellule au stade de régénération, celle-ci est automatiquement plantée. Les efforts de plantations sont donc concentrés dans ces zones plus productives.

### 3.2.4.8. Estimation des niveaux de récolte dans le modèle

Deux méthodes ont été appliquées dans le contexte du projet pour établir les niveaux de récolte : l'optimisation des niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu par recherche binaire et l'imposition d'un niveau de récolte variable. Ces deux processus sont décrits aux sections suivantes.

#### Optimisation des niveaux de récolte à rendement soutenu

Le niveau de récolte maximal à rendement soutenu est établi de façon itérative, à l'aide d'une recherche binaire. Pour y arriver, le modèle commence par tester un niveau de récolte arbitraire, par exemple celui qui figure au dernier calcul des possibilités forestières. S'il n'y a pas de rupture de stock<sup>14</sup> au cours de la simulation, le modèle tente un niveau de récolte plus haut. Si, comme à la Figure 10, le premier essai génère des ruptures de stock au cours de la simulation, un niveau de récolte plus bas est testé à l'itération suivante. Le modèle continue ainsi à tester des niveaux de récolte jusqu'à ce que l'écart entre (A) le niveau le plus haut testé sans rupture de stock et (B) le niveau le plus bas causant des ruptures de stock ne soit séparé par au plus 2,5 % du niveau de départ. Le niveau de récolte maximal à rendement soutenu est alors le niveau A, le niveau de récolte le plus élevé n'ayant pas engendré de rupture de stock au cours de la simulation.

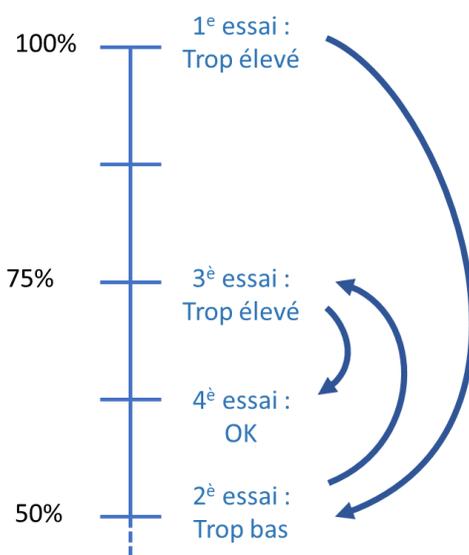


Figure 10. Illustration de la recherche binaire appliquée au processus d'optimisation du taux de récolte à rendement maximal soutenu.

#### Imposition des niveaux de récolte avec ajustement dans le temps

L'autre méthode pour régler les niveaux de récolte appliquée par le modèle consiste à imposer un niveau selon une cédule fixée à l'avance. Le modèle tente donc d'atteindre la cible de récolte tous les ans, et enregistre une rupture de stock si cette cible n'est pas atteignable lors d'une année de simulation. Cette méthode permet de tester de façon simple un niveau de récolte fixe ou l'effet d'une baisse ou d'une augmentation de la récolte dans le temps. Lorsque les niveaux de récolte sont ajustés à la baisse, le phénomène s'apparente au « *fall-down effect* », tel qu'il a été nommé en Colombie-Britannique<sup>15</sup>.

### 3.2.4.9. Évaluation des taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier

Les taux de perturbation de l'habitat du caribou sont évalués par le modèle à chaque étape de temps. Le modèle place sur les perturbations anthropiques (la récolte, la coupe de récupération, l'éclaircie précommerciale et la plantation) une zone tampon de 500 mètres (Environnement Canada, 2011), et comptabilise la superficie occupée par ces tampons ainsi que par les perturbations naturelles (feu et mortalité sévère due à la tordeuse) par unité

<sup>14</sup> Une rupture de stock a lieu lorsque la cible de récolte ne peut être atteinte faute de volume disponible au courant de l'année.

<sup>15</sup> <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/library/documents/glossary/1990s/F.htm>.



territoriale d'analyse. Le modèle BFEC-CC considère que les perturbations naturelles et anthropiques influencent le taux de perturbation du caribou forestier pour une période de 50 ans. Cette superficie comptabilisée est ensuite exprimée en pourcentage de la superficie totale de l'UTA, ce qui donne le taux de perturbation global pour l'UTA.

### 3.2.4.10. Sorties du modèle BFEC-CC

Le modèle BFEC-CC produit une grande quantité d'informations. À l'heure actuelle, le modèle génère pour chaque simulation 34 fichiers distincts, chaque fichier contenant de l'information sur, par exemple, l'état de la forêt, les travaux sylvicoles appliqués, le niveau de récolte (résineux, feuillu et récupération après feu) et l'habitat à chaque période de temps (un an). Une liste complète des fichiers en sorties est présentée en annexe.

Des sorties spatialement explicites sont aussi produites par le modèle, quoiqu'elles n'aient pas été utilisées dans les analyses. Elles ont principalement servi à la vérification du bon fonctionnement du modèle pendant son développement.

## 3.3. Processus itératif d'apprentissage et de conception des scénarios

Tel que mentionné à la section 2.6, un processus évolutif est souvent nécessaire pour offrir des choix au décideur. Pour le développement de modalités d'adaptation dans un contexte d'aménagement forestier, le processus d'apprentissage rend ce caractère évolutif nécessaire. Dans le cadre du projet, le Forestier en chef et les planificateurs de la région ont fait partie du processus d'aide à la décision. Les résultats leur ont tous été présentés et leurs recommandations quant aux modalités d'adaptation à tester ont été prises en compte.

### 3.3.1. Conception des modalités d'adaptation

Une fois le modèle rendu fonctionnel, des scénarios préliminaires ont été testés pour simuler l'effet des changements climatiques sur la forêt en absence de modalités d'adaptation. Des analyses de sensibilité, ayant comme objectif de tester les interactions parmi les différents processus du modèle (section 2.4.2), ont aussi été testées. L'essentiel de ces scénarios est présenté au Tableau 12.

**Tableau 12. Illustration des processus modélisés dans les scénarios préliminaires testés à l'aide du modèle BFEC-CC**

Appellations	Composantes simulées					Contrainte vieilles forêts
	Productivité	Feux	TBE	Échec de régénération	Aménagement forestier	
Prod	✓	✗	✗	✗	✓	✓
ProdFeu	✓	✓	✗	✗	✓	✓
SansAménagement	✓	✓	✓	✓	✗	-
StatuQuo	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SansVF	✓	✓	✓	✓	✓	✗

À partir de ces scénarios, une série de constats a pu être établie. Ces constats, nommés ici « apprentissages », ont servi de point de départ à la formulation de diverses actions appelées « modalités d'adaptation » qui sont comparées entre elles dans le cadre du projet. Elles proviennent d'essais, premièrement pour comprendre la réaction de la modélisation selon différents paramètres et le comportement des indicateurs.

Par la suite, les apprentissages successifs font en sorte que la construction des modalités devient un processus itératif dans la recherche d'une solution satisfaisante. Les modalités ne sont pas prédéfinies, elles résultent de la revue de littérature et de l'expertise des intervenants au processus. Au fil des apprentissages, des modalités sont combinées afin de vérifier les synergies permettant d'obtenir des modalités plus performantes. Plusieurs modalités ont été évaluées dans le cadre du projet et les plus importantes sont présentées au Tableau 13.

**Tableau 13. Modalités d'adaptation testées dans les différents scénarios. Le scénario *Statu quo* est inclus pour faciliter la comparaison de ce scénario avec les scénarios d'adaptation**

Appellations	Zones d'aménagement intensif	Aménagement extensif		
		Contrainte vieilles forêts	% de la superficie plantée en feuillus	Superficie plantée, par rapport au <i>Statu quo</i>
<i>Statu quo</i>	✘	✔	0%	1X
F100	✘	✔	100%	Sans limite
Intensif	✔	✔	0%	1X
Intensif_F50	✔	✔	50%	1X
Intensif_F50_Plant2	✔	✔	50%	2X

Parfois, certaines modifications ont dû être apportées au modèle pour lui permettre de répondre à ces nouvelles questions; la teneur de ces modifications est incluse dans la description du modèle ci-haut (section 3.2.2). Au total, près d'une centaine de scénarios distincts ont été testés dans le cadre du projet.

### 3.3.2. Cheminement du processus d'aide à la décision

#### 3.3.2.1. Définition d'un ensemble d'indicateurs en lien avec l'aide à la décision

Le cheminement habituel d'un processus de décision passe par l'identification des objectifs importants pour le décideur. Aux fins du projet, ces objectifs ont été traduits en indicateurs mesurables. Bien que ces derniers aient pu être plus nombreux, il était important de couvrir, par un certain nombre d'indicateurs, les principales dimensions de l'environnement du problème. Ainsi, les dimensions « Durabilité », « Faisabilité » et « Équité intergénérationnelle » ont été jugées représentatives pour le processus décisionnel. Le Tableau 14 présente les indicateurs retenus et évalués dans le but d'éclairer les décisions. Ils serviront par la suite à comparer les modalités testées.

Les indicateurs conservent leurs propres unités de mesure, car il n'est pas souhaitable, à ce stade, de tenter de les agréger selon une seule échelle de mesure. De plus, en fonction des objectifs poursuivis, le processus identifie les indicateurs qui sont à maximiser ou à minimiser.



**Tableau 14. Indicateurs retenus pour le processus d'aide à la décision**

Indicateurs	Unités	Objectifs
Pourcentage de vieilles forêts	% de la superficie forestière	Maximiser
Pourcentage des superficies forestières en échec de régénération	% de la superficie forestière	Minimiser
Taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier	% de la superficie terrestre	Minimiser
Superficie moyenne plantée annuellement	ha/an	Minimiser
Portion de la récolte provenant des bois brûlés	% des volumes récoltés	Minimiser
Niveau de récolte	m <sup>3</sup> /an	Maximiser

### 3.3.2.2. Évaluation

Les résultats de la modélisation permettent de construire une matrice d'évaluation des scénarios et des modalités d'adaptation selon chacun des indicateurs retenus. Puisque le modèle évalue les six indicateurs pour chaque année de l'horizon de 150 ans, une première agrégation doit être réalisée afin que le décideur puisse obtenir une vue synthèse des résultats exprimant l'espace temporel. Les notions de court, moyen, long et très long terme sont alors introduites. Elles correspondent à des moyennes basées sur les périodes de temps (Tableau 15). Cette orientation du projet vise à simplifier le problème par la diminution des mesures temporelles et ainsi, la taille de la matrice d'évaluation à analyser aux fins du projet.

**Tableau 15. Périodes de temps utilisées pour synthétiser les résultats**

Périodes de temps	Années
Court terme	2020 à 2050
Moyen terme	2051 à 2075
Long terme	2076 à 2120
Très long terme	2121 à 2170

Par ailleurs, les indicateurs sont évalués pour chaque modalité d'adaptation selon chacun des scénarios climatiques. La matrice d'évaluation obtenue sera telle qu'illustrée au Tableau 16. La matrice présente donc 12 valeurs pour chaque indicateur par modalité

**Tableau 16. Canevas de la matrice d'évaluation pour un indicateur donné**

Modalités d'adaptation	Périodes	Indicateur a		
		Climat historique	RCP 4.5	RCP 8.5
A	Court terme	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
	Moyen terme	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
	Long terme	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>
	Très long terme	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>
B	Court terme	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
	Moyen terme	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>
	Long terme	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>9</sub>
	Très long terme	B <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>

### 3.3.2.3. Modélisation des préférences

Compte tenu de facteurs dans l'environnement du problème tels que le niveau de satisfaction, le seuil de perception, l'incertitude, l'imprécision, etc., il est possible d'interpréter de différentes façons un écart de performance entre deux modalités d'adaptation sur un indicateur donné. Il est donc essentiel de spécifier ou de préciser le pouvoir discriminant de ces indicateurs. Selon Roy (1985), le pouvoir discriminant représente « la faculté plus ou moins marquée pour discriminer des situations de préférence stricte, d'indifférence et de préférence faible entre deux actions sur la base de la différence de leurs évaluations ».

Ainsi, dans le cadre du projet, le décideur peut être plus ou moins tolérant sur des variations sur un indicateur en fonction du temps et accepter des compromis sur certains des indicateurs. Par exemple, il peut être indifférent à une variation de  $\pm 5\%$ , préférer une modalité à une autre parce qu'elle aura une évaluation supérieure de  $10\%$  ou rejeter une modalité en particulier, car son évaluation aura dépassé son seuil de tolérance. Des intervalles de préférence, d'inconfort et de rejet sont alors introduits pour sélectionner les modalités plus prometteuses et pour aider à en développer de nouvelles qui pourraient être plus performantes.

Par ailleurs, il se peut que tous les indicateurs n'aient pas la même importance pour un décideur. De même, face à un même problème, l'importance relative attribuée à ces derniers peut aussi changer dans le temps.

À cette étape de la modélisation des préférences, la méthode de distribution des poids est couramment utilisée. Il est donc demandé au décideur de préciser le pouvoir discriminant qu'il accorde aux indicateurs. Par exemple, il peut les ranger du plus important au moins important et distribuer 100 points entre ces derniers. Le pointage indique l'importance qu'il accordera aux indicateurs lorsqu'il prendra sa décision. Cet exercice permet d'obtenir l'information pour mettre en relation les indicateurs. Le Tableau 17 montre les informations reliées au pouvoir discriminant des indicateurs qui sont demandées au décideur.

**Tableau 17. Préférences du décideur**

Indicateurs	Poids	Intervalles		
		Préférence	Inconfort	Rejet
A	P <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
B	P <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
C	P <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>

Cette étape de l'aide à la décision comporte une bonne part de subjectivité qui s'exprime en fonction des valeurs du décideur et de ses objectifs. Aux fins du projet, des intervalles ont été fixés par l'équipe de réalisation sans nécessairement refléter la réalité. De leur côté, les poids des indicateurs ont été considérés égaux pour la comparaison entre eux et en ce qui concerne les périodes de temps.



### 3.3.2.4. Analyse des compromis entre les modalités d'adaptation retenues

Chaque modalité d'adaptation peut présenter une amélioration en lien avec un indicateur selon son objectif, mais il est pertinent d'observer si ces améliorations ne sont pas en contradiction avec l'atteinte d'autres objectifs. Pour analyser les compromis entre chaque modalité d'adaptation testée, pour tous les scénarios RCP, les modalités ont été représentées sous la forme de graphique radar. Pour ce faire, les données pour chaque période de temps ont été normalisées entre zéro et 1. La valeur 1 représente la valeur la plus performante quant à l'indicateur en question et son objectif tandis que la valeur 0 représente la moins performante. Les niveaux de récolte dépassant la possibilité forestière se sont vus attribuer la valeur 1 et n'ont pas été utilisés pour la normalisation, la valeur plus performante étant la possibilité forestière actuelle pour cet indicateur. Comme les poids associés à chaque période étaient égaux, la somme des valeurs normalisées par période a été utilisée pour la représentation graphique. Donc, le graphique radar représente l'atteinte des objectifs des indicateurs pour chaque modalité testée et le scénario *statu quo* sous les scénarios de changements climatiques sur l'ensemble de l'horizon de simulation.

### 3.3.2.5. Classement des modalités d'adaptation selon les objectifs

L'étape finale d'un processus d'aide à la décision consiste à agréger l'information disponible afin de dégager la ou les solutions les plus satisfaisantes pour le décideur. De nombreuses procédures d'agrégation ont été développées au fil du temps en fonction des problématiques rencontrées. Cependant, la procédure d'agrégation multicritère doit être sélectionnée en fonction de la problématique de décision retenue (Bana e Costa, 1996). Roy (1985) a défini quatre problématiques de décision qui doivent être mises en relation avec la procédure d'agrégation multicritère appropriée à la situation :

- La **problématique du choix** permet de sélectionner les solutions afin de mettre en évidence un sous-ensemble qui contiendrait la meilleure. Elle consiste à poser le problème en termes de choix d'une seule « meilleure » solution.
- La **problématique du tri** consiste à affecter ou segmenter les actions dans différentes catégories définies *a priori* pour séparer les meilleures des moins bonnes.
- La **problématique du rangement** consiste à classer ou ranger les actions probables des plus satisfaisantes aux moins satisfaisantes, et ce, en les regroupant en classes d'équivalence. Les classes ne sont pas définies *a priori* comme pour la problématique de tri. L'investigation s'oriente alors vers la mise en évidence d'un classement défini de l'ensemble des actions en vue de les discriminer. Ces dernières sont donc ordonnées selon un ordre de préférence en les regroupant en classes d'équivalence donc, un classement de la meilleure à la moins bonne avec éventuellement des *ex æquo* (Martel, 1999).
- La **problématique de description** est une procédure qui aide le décideur à comprendre les différentes actions et leurs conséquences. Elle consiste à poser le problème en termes limités à une description des actions potentielles et de leurs conséquences, c'est-à-dire à orienter l'investigation vers la mise en évidence d'informations relatives aux actions potentielles conçues en vue d'aider directement le décideur à les découvrir, à les comprendre, à les jauger, et ce, compte tenu du caractère révisable et transitoire de l'ensemble des actions.

Dans le cadre du projet, le décideur est confronté à une problématique de rangement où les modalités d'adaptation analysées seront classées ou rangées de la meilleure à la moins bonne. Par contre, la problématique de description est constamment présente, car le projet étant évolutif, il s'agit de tabler sur les apprentissages pour concevoir de meilleures modalités.

Pour réaliser le rangement, une méthode relativement simple a été utilisée pour le moment. Le rangement des modalités d'adaptation de la meilleure à la moins bonne a été effectué en attribuant un pointage pour chacune des cellules de la matrice d'évaluation. De cette manière, pour un indicateur donné à une période de temps donnée, les évaluations des scénarios se voient attribuer un pointage, de la meilleure évaluation à la moins bonne, en acceptant des *ex æquo* si les valeurs sont suffisamment proches qu'il soit difficile de discriminer deux modalités. Le pointage de « 1 » a été attribué à la meilleure performance, « 2 » à la suivante et ainsi de suite. Cette étape est réalisée pour chacun des indicateurs pour les scénarios climatiques séparément. Les pointages individuels sont par la suite additionnés par modalité. Plus le pointage est élevé, plus la modalité s'éloigne de la

performance attendue de la modalité. Un pointage idéal serait équivalent au nombre d'indicateurs évalués, car ils obtiendraient tous la note « 1 ». L'exercice du pointage tient évidemment compte de l'échelle de mesure, qui est à maximiser ou à minimiser, selon les indicateurs.

Les résultats obtenus peuvent être interprétés en fonction de la période de temps ou globalement par scénario. Un des avantages de cette méthode repose sur la possibilité d'identifier les scénarios performants à un moment donné dans le temps. Ces « segments » peuvent être utilisés par la suite en combinaison pour développer des mesures d'adaptation plus performantes, suivant le caractère évolutif du processus d'aide à la décision.

Dans le cadre du projet, les méthodes d'agrégation multicritères existantes n'ont pu être utilisées. Elles devront faire l'objet d'évaluation plus poussée et possiblement être adaptées en fonction de la complexité du problème.

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Apprentissages

Les apprentissages issus du projet sont présentés selon l'ordre dans lequel ils ont été acquis. Il est important de noter que ces apprentissages ont été établis en fonction des résultats du modèle BFEC-CC et des suppositions qui y ont été intégrées. La nature de ces apprentissages pourrait être appelée à changer si d'autres modèles ou d'autres suppositions étaient utilisés.

#### 4.1.1. Apprentissages préliminaires

Les résultats des scénarios préliminaires (section 3.3.1) ont permis une bonne compréhension du comportement du modèle BFEC-CC et des impacts possibles des changements climatiques sur la forêt en absence de modalités d'adaptation. Les apprentissages qui découlent de ces résultats sont présentés aux sous-sections suivantes.

##### 4.1.1.1. Il y a des différences importantes entre les scénarios climatiques, mais non entre les modèles climatiques

L'examen des résultats de modélisation avec BFEC-CC indique que, même s'il existe souvent des différences importantes entre les différents scénarios climatiques (historique, RCP 4.5, RCP 8.5), les trois modèles climatiques (ESM) mènent souvent à des résultats comparables (Figure 11). Pour cette raison, seuls les résultats du modèle canadien (CanESM2) sont présentés aux sections suivantes.

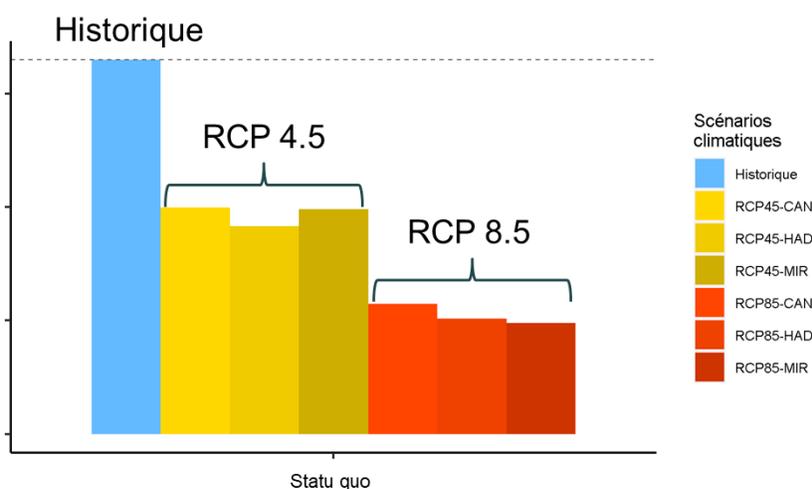


Figure 11. Illustration de la divergence entre les résultats liés aux différents scénarios climatiques (RCP) et la convergence des résultats pour un même scénario climatique de différents modèles climatiques (ESM).



### 4.1.1.2. Même en absence de récolte, il y aura beaucoup moins de forêt fermée et de vieilles forêts sous changements climatiques

Ayant intégré les feux et le cumul des échecs de régénération, les simulations indiquent qu'il y aura beaucoup plus de forêt non stockée (forêt ouverte ou landes) et, à la fois, beaucoup moins de vieilles forêts sous changements climatiques (Figure 12). Les échecs de régénération sont causés par le passage du feu dans des peuplements n'ayant pas atteint la maturité reproductive.

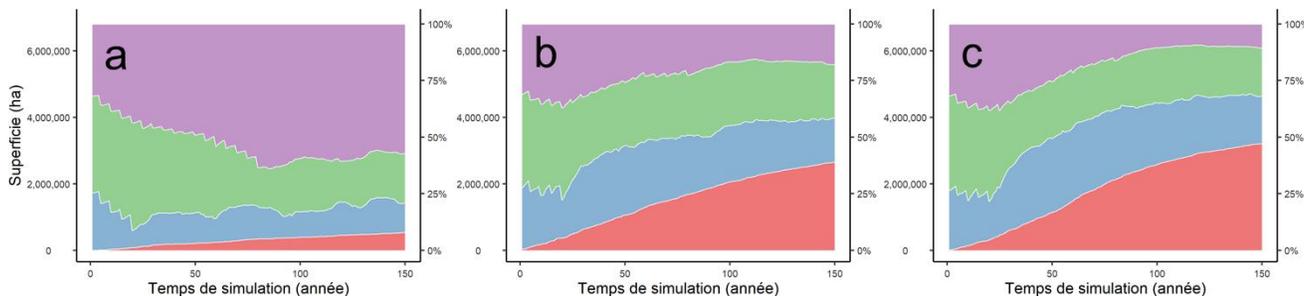


Figure 12. Abondance des classes d'âge en absence d'aménagement forestier sous (a) le climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. La superficie en échec de régénération apparaît en rouge, en régénération en bleu, la forêt précoce et mature est représentée en vert et les vieilles forêts en mauve.

### 4.1.1.3. Sous changements climatiques, les cycles de feu seront plus courts

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet concordent avec les conclusions issues des travaux de recherche qui ont alimenté la simulation des feux (Boulanger et coll., 2014 et 2017). Sous changements climatiques, les cycles de feu seront beaucoup plus courts qu'historiquement. En effet, le cycle de feu sous un climat historique en simulant l'aménagement *statu quo* passe de plus de 300 ans à moins de 100 ans pour les scénarios sous changements climatiques (Figure 13), en moyenne sur la période de simulation. Il doit être noté que les conditions climatiques plus sévères (de 2071 à 2100) sont maintenues dans le modèle de 2071 à 2170, donc sur une période plus de trois fois plus longue que les conditions climatiques 2011-2040 et 2041 à 2070.

Cet apprentissage a mené au développement de la modalité d'adaptation d'enrichissement en feuillus pour voir s'il est possible de contrôler le régime de feu en manipulant la composition du paysage forestier (section 4.1.2.1).

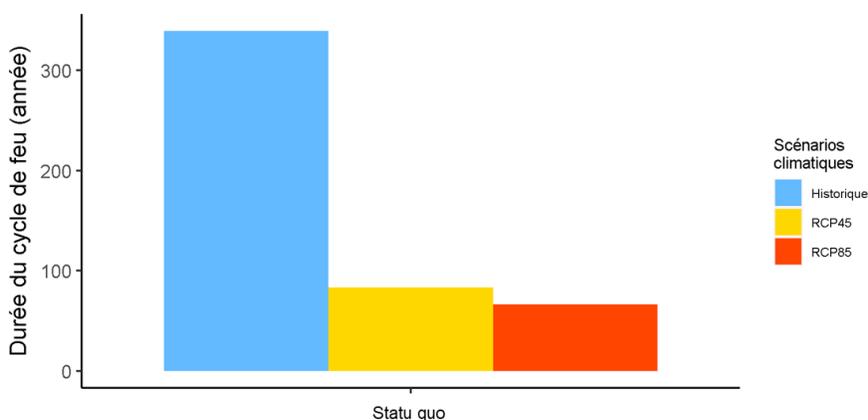
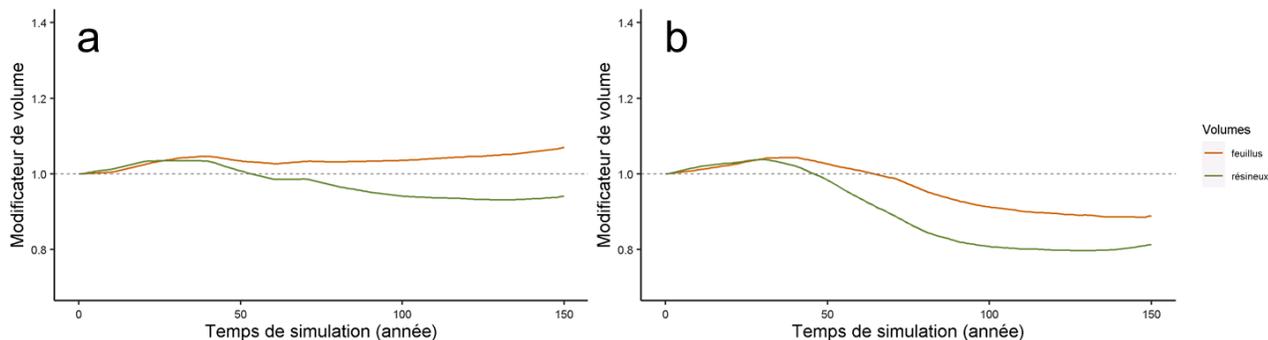


Figure 13. Durée moyenne des cycles de feu obtenue sous le scénario *statu quo* pour les trois scénarios climatiques testés.

### 4.1.1.4. Les gains en productivité des résineux dus aux changements climatiques seront relativement faibles et transitoires

Lorsque les facteurs de correction du volume marchand en fonction des changements climatiques sont appliqués dans le cadre de la simulation, les résultats démontrent que, en moyenne, la productivité des essences résineuses

augmente légèrement au cours des prochaines 50 années pour ensuite diminuer en deçà des valeurs historiques. En effet, sous RCP 4.5 (Figure 14a) et RCP 8.5 (Figure 14b), la productivité résineuse est supérieure aux valeurs historiques (où le modificateur de volume est supérieur à 1) pour une période d'à peu près 50 ans (de 2020 à 2070). Par la suite, la productivité résineuse diminue en particulier sous le scénario climatique RCP 8.5.

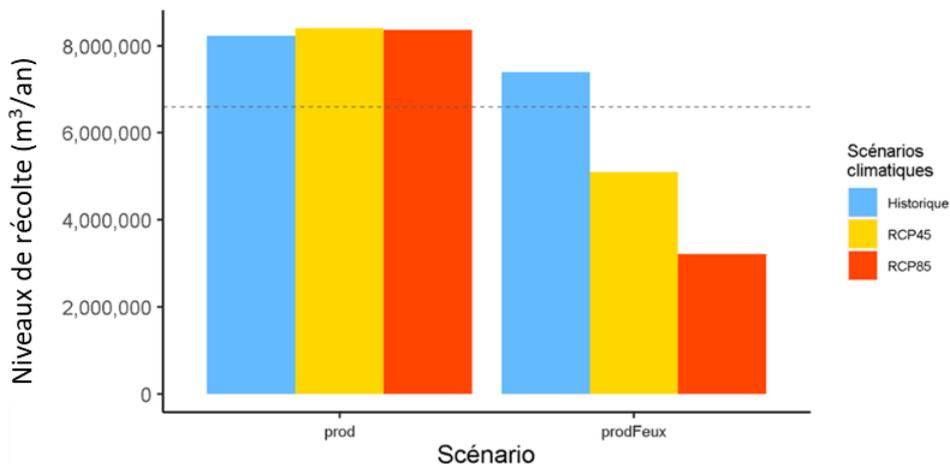


**Figure 14. Valeurs moyennes des modificateurs de volume marchand (pondérées par la superficie) au cours des 150 ans de simulation du scénario *statu quo* sous (a) RCP 4.5 et (b) RCP 8.5 pour le volume résineux (en vert) et feuillu (en orange). La ligne pointillée est la valeur du modificateur (égale à 1) sous climat historique.**

La productivité des essences feuillues demeure, en moyenne, supérieure à la productivité historique sous le scénario climatique RCP 4.5 (Figure 14a). Sous le scénario climatique RCP 8.5, la productivité des essences feuillues demeure supérieure aux valeurs historiques pour une période d'approximativement 70 ans, mais passe en deçà des valeurs historiques par la suite (Figure 14b).

#### 4.1.1.5. Sur 150 ans, les gains en productivité ne seront pas suffisants pour compenser l'effet des feux

La productivité forestière accrue en début de simulation (Figure 14) engendre une légère hausse des niveaux de récolte à rendement maximal soutenu lorsque les feux ne sont pas intégrés à la simulation (Figure 15, à gauche). Par contre, lorsque les feux sont intégrés aux simulations (Figure 15, à droite), l'effet d'une productivité accrue n'est pas suffisant pour compenser l'effet négatif des feux sur la disponibilité des volumes pour la récolte.



**Figure 15. Niveaux de récolte sous le scénario *statu quo* estimés en intégrant uniquement l'effet des changements climatiques sur la productivité (à gauche) et en intégrant aussi l'effet des feux (à droite). Aucune autre perturbation n'a été intégrée à ces simulations. Ces niveaux de récolte représentent, dans chaque cas, le rendement maximal soutenu étant donné les suppositions fournies au modèle.**



#### 4.1.1.6. Sous changements climatiques, l'effet de la tordeuse deviendra moins important

Dans le contexte de la modélisation du projet, la superficie touchée par une mortalité sévère due à la tordeuse des bourgeons de l'épinette diminue considérablement sous l'effet des changements climatiques. Sous le scénario *statu quo*, cette superficie est en moyenne supérieure à 6 000 hectares par an (sur toutes les années de simulation) sous un climat historique, ne dépasse pas 2 000 hectares par an sous le scénario RCP 4.5 et 1 000 hectares sous le scénario RCP 8.5. Les patrons annuels de mortalité forte due à la tordeuse selon les trois scénarios climatiques sont présentés à la Figure 16. Ces effets climatiques semblent être principalement dus à l'augmentation de température projetée pour la région sous changements climatiques, la forêt de la région devenant moins propice pour l'insecte. L'effet de rajeunissement de la forêt sous changements climatiques est aussi en partie responsable de cet effet (Tableau 9). Des analyses de sensibilité seront nécessaires pour éclairer l'importance relative des processus causaux.

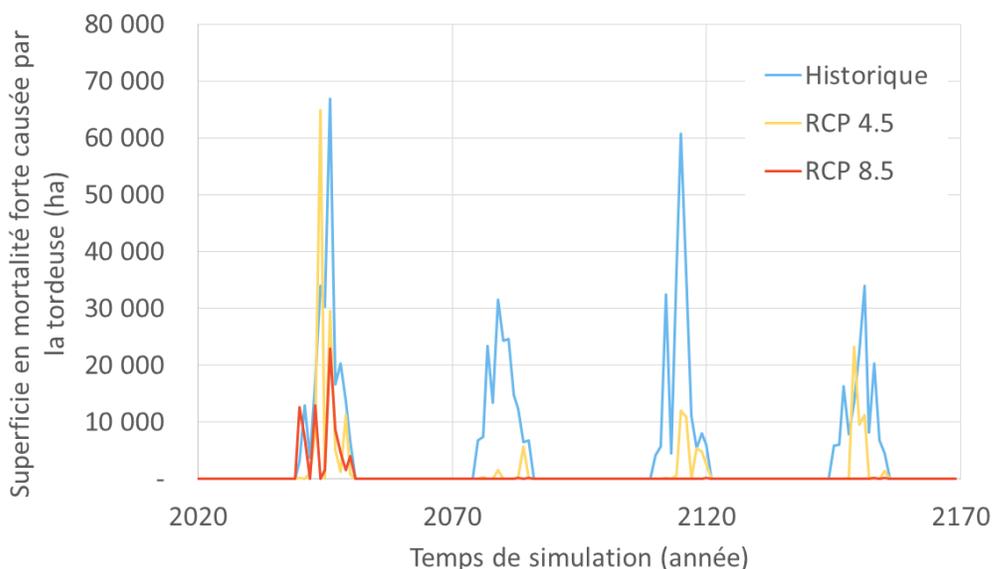


Figure 16. Superficies touchées par année par une mortalité forte due à la tordeuse sous les trois scénarios climatiques au cours de la période de simulation.

#### 4.1.1.7. En maintenant la stratégie d'aménagement actuelle, les niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu sous changements climatiques seront beaucoup plus faibles qu'auparavant

En appliquant la stratégie d'aménagement actuelle (la stratégie *statu quo*) ainsi que l'ensemble des perturbations intégrées au projet (feu, tordeuse, effet sur la productivité et échec de régénération), les niveaux de récolte diminuent de façon importante. Les changements climatiques entraînent une baisse de 39 % sous le scénario RCP 4.5 (Figure 17) et de 65 % sous le scénario RCP 8.5 (Figure 17).

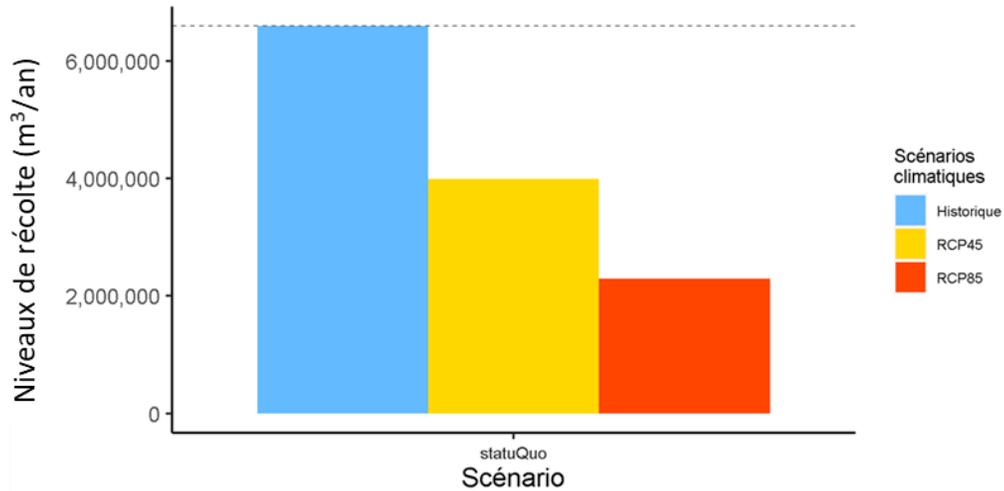


Figure 17. Niveaux de récolte obtenus en simulant le scénario *statu quo* sous les scénarios climatiques : historique, RCP 4.5 et RCP 8.5.

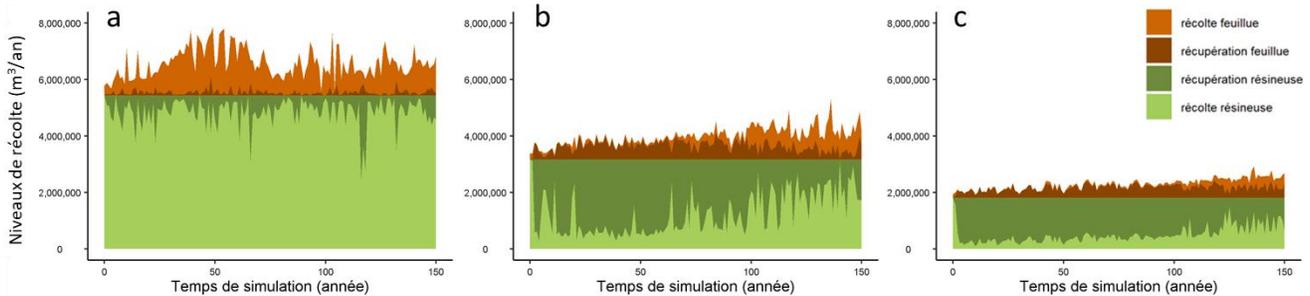


Figure 18. Niveaux de récolte annuels de volume résineux (en vert) et feuillu (en orange) au cours des 150 ans de simulation avec le scénario *statu quo*, sous (a) climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le volume récupéré après feu est représenté en teinte plus foncée (vert foncé pour le résineux et orange foncé pour le feuillu).

Il doit être souligné que sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, une proportion importante des volumes récoltés dans le modèle proviennent des bois récupérés après feu (Figure 18b et Figure 18c). Cette proportion récupérée, qui est récoltée prioritairement, diminue vers la fin de la simulation malgré une hausse des feux parce que, suivant un rajeunissement graduel de la forêt, de moins en moins de stock sur pied est éligible pour la récupération après feu (section 3.2.4.5).

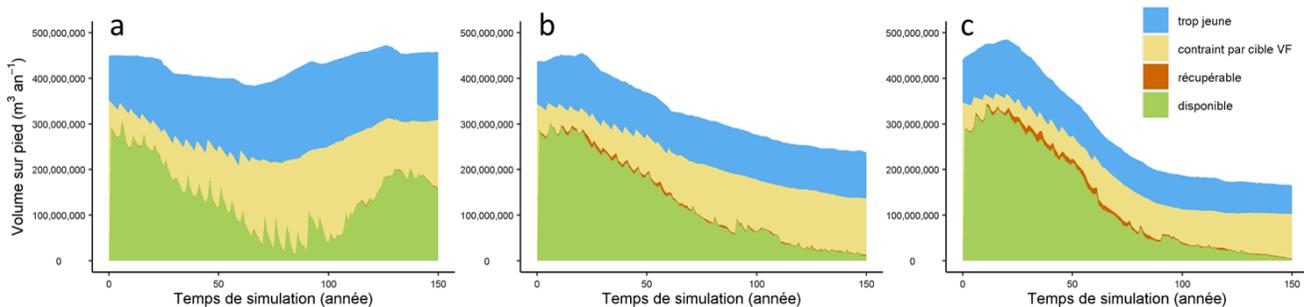


Figure 19. Volume sur pied dans la région au cours des simulations du scénario *statu quo*, sous (a) un climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le volume disponible pour la récolte est illustré en vert.

Sous un climat historique, la période contraignante pour la région a lieu dans approximativement 75 ans (Figure 19a). Par contre, sous changements climatiques, les périodes contraignantes se trouvent à la toute fin de la période de simulation (Figure 19b et Figure 19c pour les RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement).



#### 4.1.1.8. Le cumul de superficie en échec de régénération rend l'atteinte des cibles de vieilles forêts plus difficile

Sous le scénario d'aménagement *statu quo* et en simulant les changements climatiques, il y a un important cumul de superficie en échec de régénération. Cette contraction de la forêt productive rend l'atteinte des cibles de vieilles forêts plus difficile. Cette difficulté contribue de façon importante à la baisse des niveaux de récolte sous changements climatiques (Figure 17). En effet, lorsque la contrainte du maintien des vieilles forêts est retirée dans la modélisation, un important volume, précédemment rendu indisponible par la contrainte vieilles forêts (Figure 19), devient disponible pour la récolte (Figure 21).

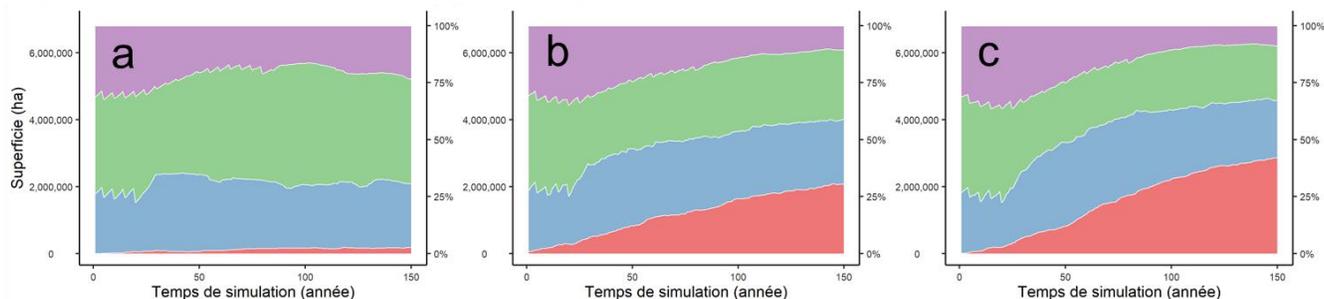


Figure 20. Abondance des classes d'âge sous le scénario *statu quo* en simulant (a) le climat historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. La superficie en échec de régénération est illustrée en rouge, la régénération en bleu, la forêt précoce et mature en vert et les vieilles forêts en mauve.

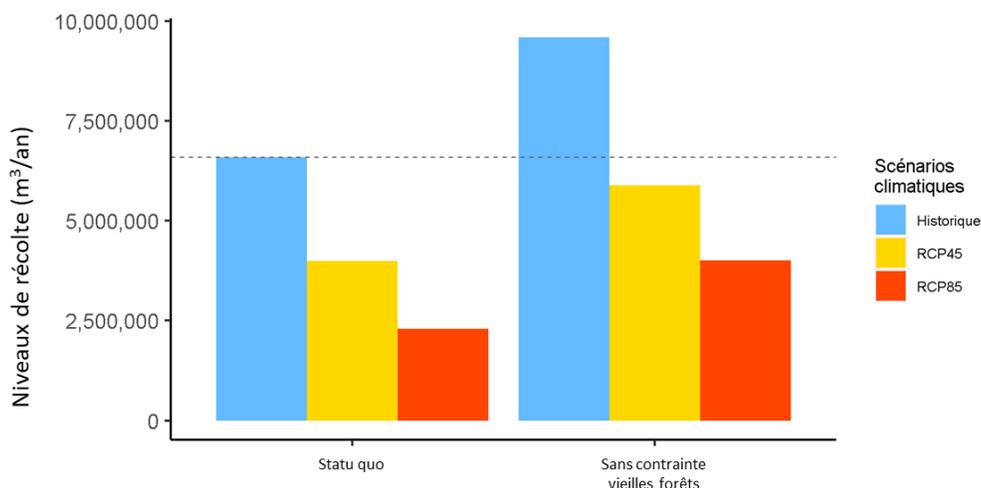
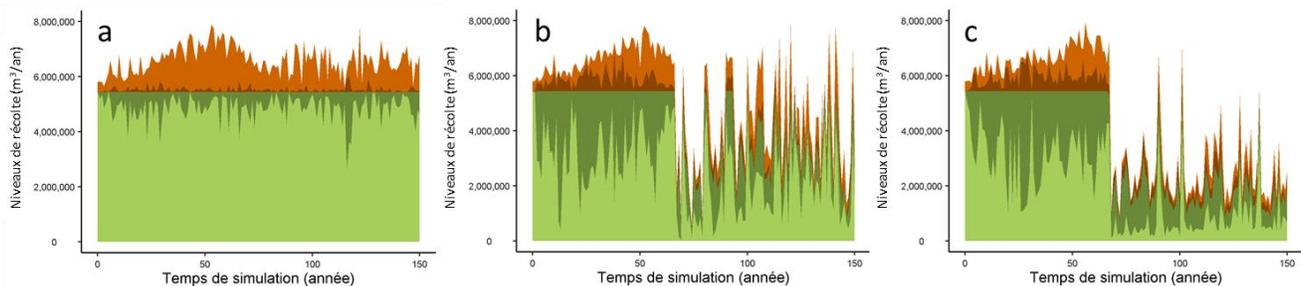


Figure 21. Analyse de sensibilité montrant l'effet de la contrainte vieilles forêts sur les niveaux de récolte.

#### 4.1.1.9. Sans adaptation, les niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu établis sous climat historique ne sont pas durables sous changements climatiques

En fonction du modèle de feu appliqué, en maintenant la stratégie d'aménagement actuellement en vigueur dans la région, les résultats (Figure 22) démontrent que cette stratégie n'est pas durable sous changements climatiques.



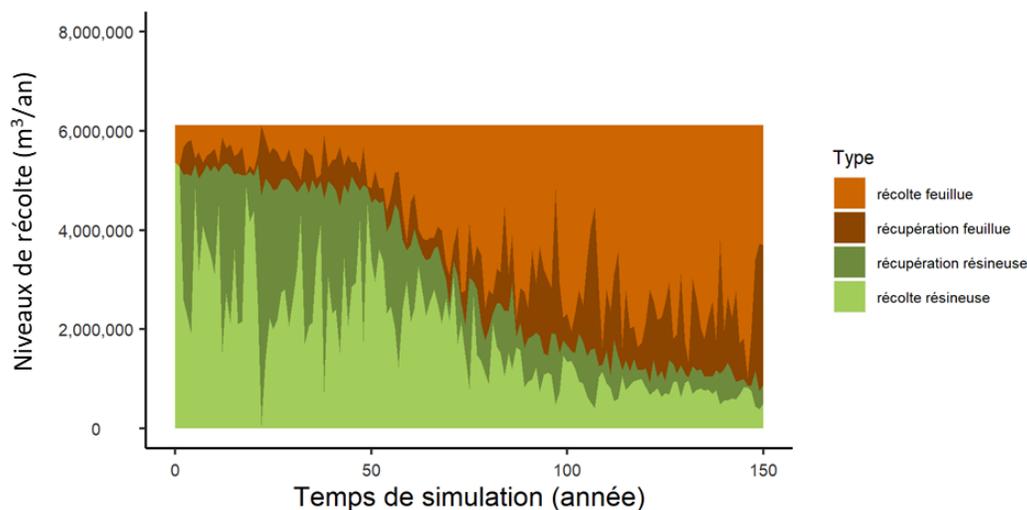
**Figure 22.** Les niveaux de récolte annuels sous le scénario *statu quo*, sous les scénarios climatiques (a) historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le niveau de récolte sous climat historique est le niveau de récolte maximal à rendement soutenu. Le niveau de récolte sous RCP 4.5 et RCP 8.5 est ce même niveau de récolte établi sous climat historique, en permettant donc des ruptures de stock en cours de simulation.

### 4.1.2. Apprentissages issus de la simulation des modalités d'adaptation

Ayant établi les apprentissages préliminaires (section 4.1.1), il a été possible d'entamer le processus de recherche de solutions : le développement de modalités d'adaptation. Les apprentissages issus de la simulation des modalités d'adaptation sont présentés aux sous-sections suivantes, dans un ordre correspondant à la chronologie de leur développement.

#### 4.1.2.1. Un important enrichissement en feuillus mène à la récolte d'un volume principalement feuillu

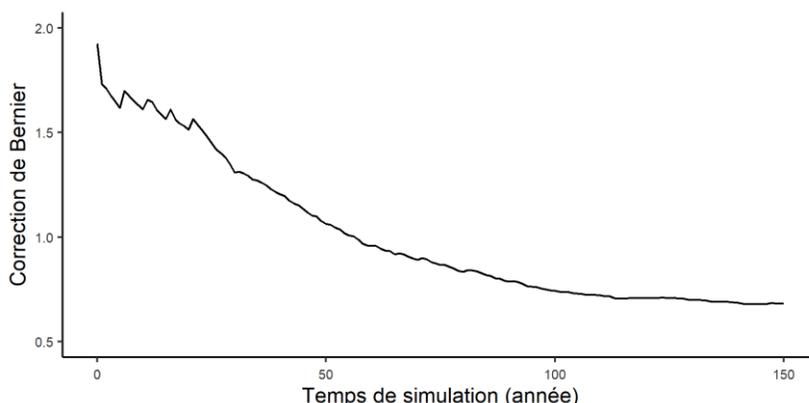
Selon la stratégie d'aménagement actuellement en vigueur dans la région à l'étude, la plantation vise l'établissement de peuplement résineux. Dans le contexte de ce projet et en partie pour contrer l'effet des feux sur la forêt, une modalité d'adaptation a été testée selon laquelle un peuplement feuillu est établi à chaque fois que la plantation est invoquée par les transitions du modèle (section 3.2.4.6) et dans tous les cas où il y a échec de régénération (section 3.2.4.4). Sous ce scénario, la forêt se convertit graduellement en forêt à dominance feuillue. La modalité demande beaucoup d'interventions sur le territoire et il en résulte que le volume récolté par le modèle devient principalement feuillu (Figure 23). Des échanges avec les partenaires du projet ont soulevé l'importance du résineux pour l'industrie forestière de la région. Cet apprentissage a mené au développement de modalités d'adaptation d'enrichissement partiel en feuillus (section 4.1.2.3).



**Figure 23.** Niveaux de récolte annuels sous un scénario d'enrichissement en feuillus au cours des 150 ans de simulation, en simulant le scénario climatique RCP 4.5.



Les résultats de la simulation de cette modalité ont démontré qu'il est possible de faire diminuer l'inflammabilité (suivi à l'aide du facteur de correction de Bernier et coll. (2016) (Figure 24) de la forêt tout en maintenant une forêt productive sur le territoire. L'inflammabilité du paysage diminue aussi avec le temps sous les scénarios *statu quo*, mais pour ce dernier scénario l'effet est principalement dû au rajeunissement de la forêt et à l'accroissement de la superficie en échec de régénération.

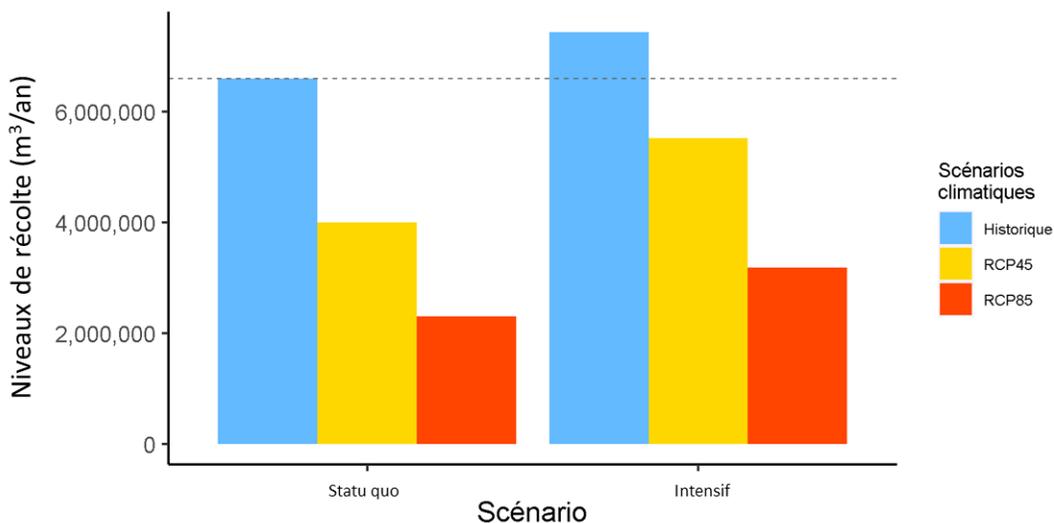


**Figure 24.** Évolution du facteur de correction de Bernier et coll. (2016) en simulant un enrichissement en feuillus sous le climat RCP 4.5. Plus le facteur de correction est élevé, plus la forêt de la région est inflammable. Un facteur de correction égal à 1 correspond au taux de brûlage duquel a été retiré l'effet de la composition (section 3.2.4.1).

Cette modalité va à l'encontre de l'élément de « dynamique naturelle » de la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (section 1.1) tout en respectant l'élément du « maintien de la capacité productive des forêts ».

#### 4.1.2.2. La création de zones d'intensification de l'aménagement forestier augmente de façon importante les niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu sous changements climatiques

En appliquant des zones d'aménagement forestier intensif sur 25 % du territoire, les niveaux de récolte augmentent de 38 % et de 39 % sous les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement. Une partie de l'effet est due au fait que les zones d'aménagement intensif sont soustraites aux contraintes de vieilles forêts. Suivant les suppositions établies, les zones d'aménagement intensif sont reboisées aussitôt qu'elles sont perturbées, soit par le feu ou par la récolte, ce qui engendre une importante superficie en plantations (section 4.2.2).



**Figure 25.** Comparaison des niveaux de récolte sous le scénario *statu quo* (à gauche) et en appliquant la modalité d'adaptation des zones d'intensification de l'aménagement (à droite).

### 4.1.2.3. En enrichissant en feuillus hors des zones d'intensification, les niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu augmentent légèrement

Pour les prochains scénarios testés, aux zones d'aménagement intensif (Intensif) ont été ajoutées (i) une plantation en alternance feuillue et résineuse en zone d'aménagement extensif selon la superficie spécifiée à la stratégie d'aménagement en vigueur (Intensif\_F50) et (ii) une plantation en alternance feuillue et résineuse, mais cette fois en doublant la superficie plantée (Intensif\_F50\_Plant2).

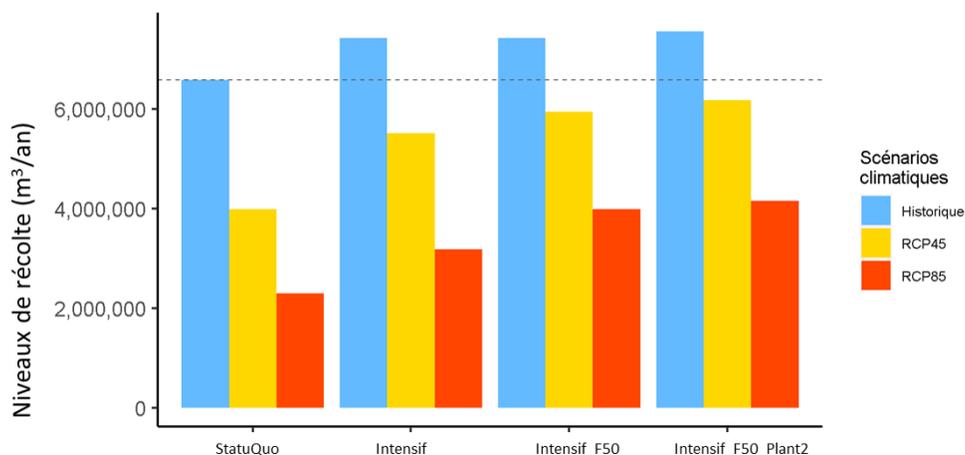


Figure 26. Comparaison des niveaux de récolte sous les scénarios *statu quo*, aménagement intensif, intensif avec une plantation en alternance feuillue et résineuse en zone extensive, et ce dernier scénario, mais en doublant la superficie plantée en zone extensive.

Sous changements climatiques, les modalités de plantations feuillues et résineuses (Intensif\_F50) et d'augmentation de la superficie plantée (Intensif\_F50\_Plant2) permettent d'augmenter légèrement les niveaux de récolte (Figure 26). Ces niveaux accrus sont principalement le résultat d'une récolte feuillue accrue, les niveaux de récolte résineux n'augmentant que très peu sous ces scénarios (Figure 27).

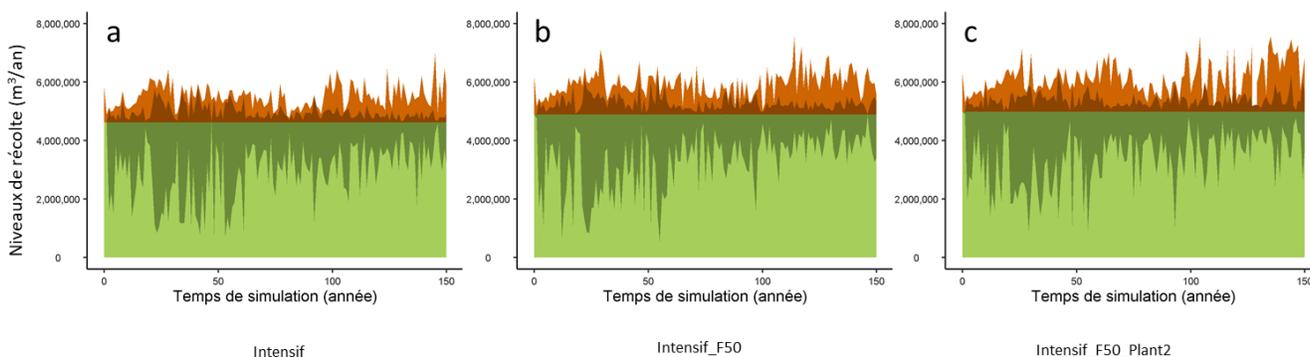


Figure 27. Niveaux de récolte annuels en appliquant les modalités d'adaptation Intensif, Intensif\_F50 et Intensif\_F50\_Plant2. Le niveau de récolte résineux apparaît en vert et le volume feuillu en orange. Le volume récupéré est en teinte plus foncée.

### 4.1.2.4. En enrichissant en feuillus hors des zones d'intensification, il y a moins de superficie en échec de régénération après 150 ans

Quoique les niveaux de récolte n'augmentent que très peu en appliquant un enrichissement en feuillus, ces modalités diminuent de façon importante le cumul de superficie en échec de régénération après 150 ans de simulation (Figure 28). Selon les suppositions appliquées dans le modèle BFEC-CC, les peuplements à dominance feuillue sont plus résilients face à un régime de feu beaucoup plus intense, n'étant pas susceptibles à



l'échec de régénération (section 3.2.4.4). Comme la modalité d'adaptation d'enrichissement en feuillus (section 4.1.2.1), ces modalités vont à l'encontre de l'élément « dynamique naturelle des forêts » tout en respectant l'élément du « maintien de la capacité productive des forêts ».

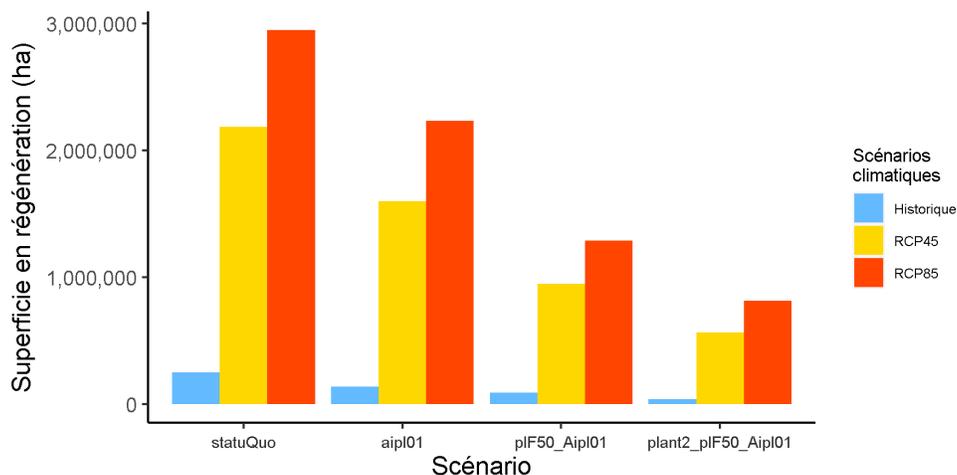


Figure 28. Superficie en échec de régénération après 150 ans de simulation sous différentes modalités d'adaptation.

#### 4.1.2.5. Les adaptations pourront pallier en partie aux ruptures de stock

Sous changements climatiques, l'application de la modalité d'adaptation Intensif\_F50\_Plant2 diminue considérablement les années en rupture de stock (Figure 22 et Figure 29). Toutefois, de nombreuses années en rupture demeurent sous RCP 4.5 et RCP 8.5 (Figure 29b et Figure 29c, respectivement). Dans le contexte de ce projet, un nombre limité de modalités d'adaptation a été testé. Dans les suites du projet, s'il demeure des années en rupture de stock une fois que toutes les modalités d'adaptation concevables aient été testées et que la meilleure ait été retenue, la seule option qui demeurera à ce moment pour stabiliser l'approvisionnement en matière ligneuse sera d'appliquer un niveau de récolte qui décroît dans le temps, semblable au « *fall-down effect* » en Colombie-Britannique. Cette approche pourrait permettre de faire une transition graduelle entre l'état actuel de la forêt et une forêt future moins productive.

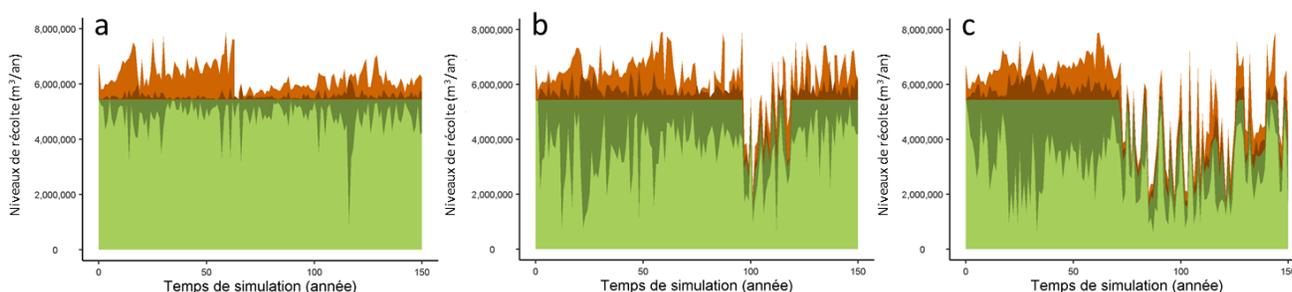
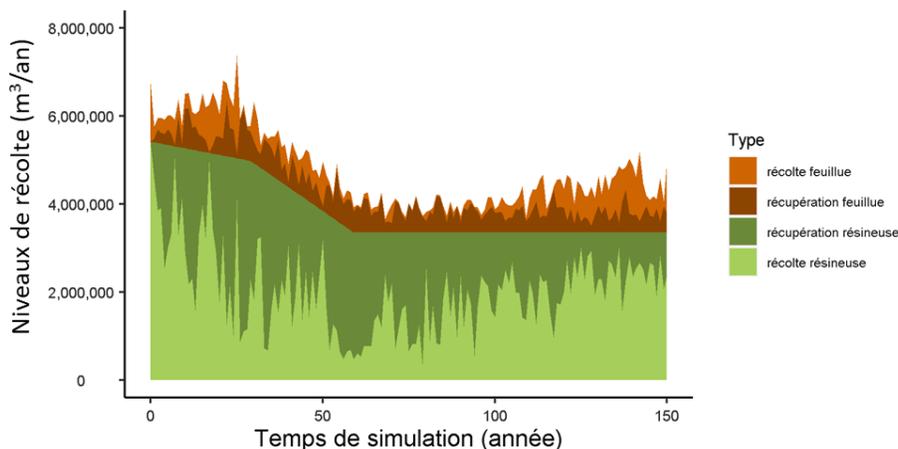


Figure 29. Les niveaux de récolte sous le scénario Intensif\_F50\_Plant2, sous les scénarios climatiques (a) historique, (b) RCP 4.5 et (c) RCP 8.5. Le niveau de récolte résineux ciblé sous climat historique est le niveau de récolte résineux maximal à rendement soutenu pour le scénario *statu quo*; le niveau de récolte sous RCP 4.5 et RCP 8.5 est ce même taux de récolte, en permettant donc des ruptures de stock en cours de simulation.



**Figure 30. Ajustements des niveaux de récolte dans le temps, cherchant à stabiliser l'approvisionnement en matière ligneuse à long terme. Ces résultats sont issus de la simulation du scénario Intensif\_F50\_Plant2 sous le scénario climatique RCP 8.5.**

## 4.2. Aide à la décision

En plus des apprentissages du projet, le cheminement d'aide à la décision permet de synthétiser les résultats de modélisation et d'apporter un éclairage quant aux choix à prendre pour le futur. Les présents résultats s'appliquent seulement pour les modalités testées dans le cadre du projet et pourraient être modifiés lorsque de nouvelles modalités seront testées à l'aide du modèle.

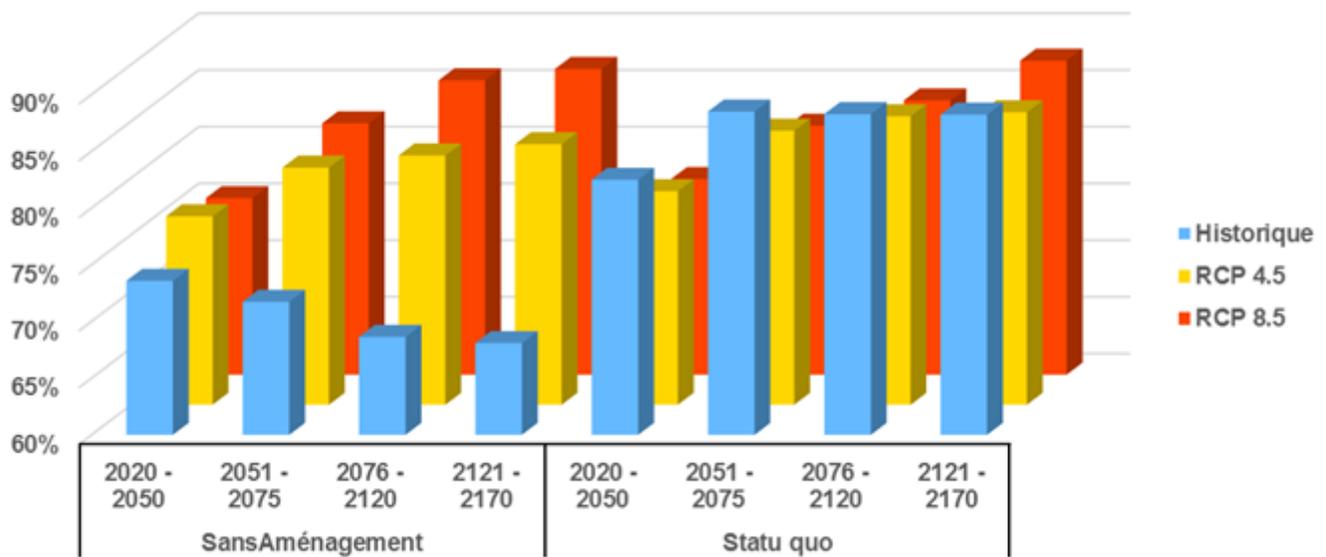
### 4.2.1. Comparaison des modalités d'adaptation

#### 4.2.1.1. Sensibilité des indicateurs de vieilles forêts et du taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier

Dans les indicateurs retenus pour l'aide à la décision, deux indicateurs ont peu de sensibilité selon les modalités d'adaptation et les scénarios d'aménagement testés sous changements climatiques.

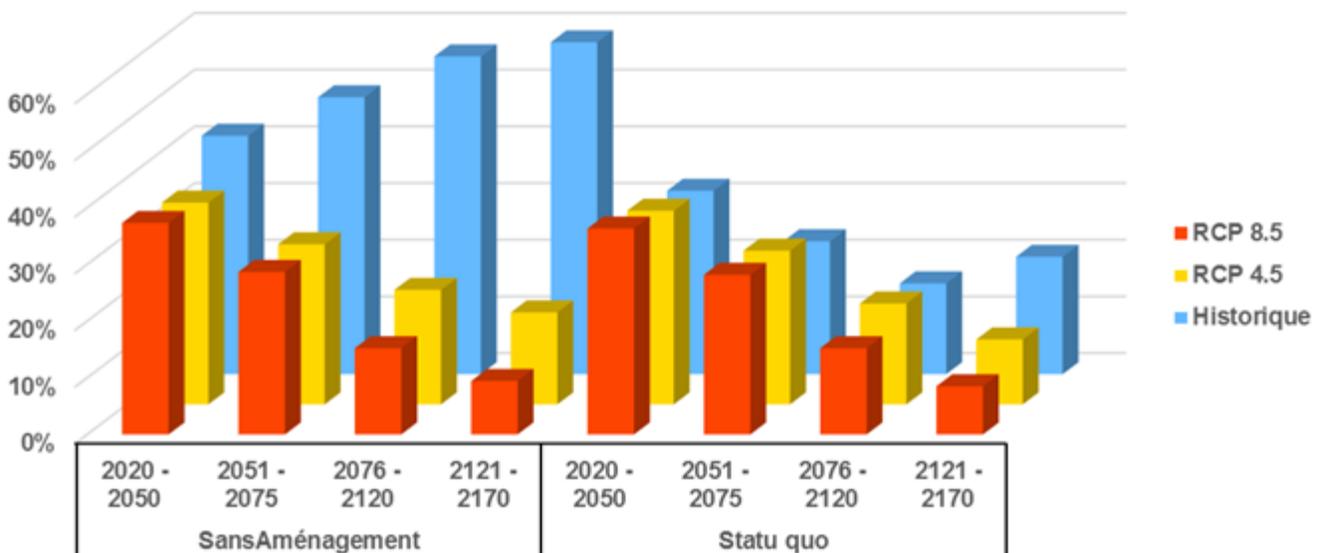
Le taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier semble suivre une tendance à la hausse sous les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 autant sans aménagement que sous *statu quo*. La raison pour laquelle les taux de perturbation sont inférieurs pour les RCP 4.5 et RCP 8.5 comparativement à l'historique sous *statu quo* est que les niveaux de récolte maximaux à rendement soutenu sont inférieurs sous les scénarios intégrant les changements climatiques. Seul le climat historique sans aménagement permet une amélioration de l'habitat du caribou forestier (Figure 31). Le rajeunissement de la forêt sous les différents scénarios de changements climatiques (Figure 12 et Figure 20) mène à accroître le taux de perturbation de l'habitat du caribou.





**Figure 31. Comparaison du taux de perturbation de l'habitat du caribou forestier sur l'ensemble de l'aire de répartition se trouvant dans la forêt aménagée de la région pour les scénarios sans aménagement et *statu quo*.**

Les échecs de régénération qui modifient de façon importante la forêt ont un impact sur la quantité de vieilles forêts sur le territoire. Bien que les cibles de vieilles forêts soient maintenues pour le scénario *statu quo*, la quantité de vieilles forêts diminue grandement sur l'ensemble du territoire (Figure 12 et Figure 20) sous changements climatiques. L'indicateur sur le pourcentage de vieilles forêts suit une tendance à la baisse sous évolution naturelle et *statu quo* sous changements climatiques. Seul le climat historique permet une hausse de la quantité de vieilles forêts sur l'ensemble du territoire sous évolution naturelle (Figure 32).



**Figure 32. Comparaison du pourcentage de vieilles forêts sur l'ensemble de la forêt aménagée de la région pour les scénarios d'évolution naturelle et *statu quo*.**

Pour mieux synthétiser les résultats, étant donné le peu de sensibilité relié à ces indicateurs dans les modalités d'adaptation, l'analyse pour l'aide à la décision a été réalisée sans ces indicateurs pour la suite du projet. Leur évaluation, selon les modalités d'adaptation testées, n'étant pas améliorée, ils s'avèrent non discriminants. Toutefois, dans le futur, ils devraient être conservés car une modalité d'adaptation pourrait démontrer une amélioration de leur état. Ils restent présents dans le modèle comme variables de suivi.

### 4.2.1.2. Matrice d'évaluation

La matrice d'évaluation créée à partir des résultats de la modélisation est présentée au Tableau 18. Ce dernier présente uniquement les indicateurs retenus comme étant significatifs. Aux fins de l'illustration, les intervalles appliqués par l'équipe du projet permettent de visualiser les zones d'acceptabilité parmi les modalités d'adaptation testées. Ces intervalles pourraient être différents en fonction des préférences et comportent une part de subjectivité. Idéalement, ils devraient être établis de façon consensuelle par les décideurs impliqués.

L'interprétation de la matrice suggère que les modalités d'adaptation évaluées sous changements climatiques ne seraient pas assez performantes pour maintenir le niveau des indicateurs dans leur plage de variabilité historique. Toutefois, la matrice indique que la modalité la plus intensive permettrait de maintenir les niveaux de récolte dans une plage acceptable, en fonction des intervalles établis, sous RCP 4.5. Les compromis nécessaires ou les efforts supplémentaires soulignés par les évaluations sur l'effort de récupération et la quantité de plantation indiquent que la recherche de modalités d'adaptation plus performantes doit être poursuivie.

En fonction de la quantité de modalités d'adaptation testées et d'indicateurs, la matrice d'évaluation pourrait devenir rapidement trop complexe à interpréter. Cette complexité d'interprétation amène à évaluer une autre méthode pour comparer les résultats, soit analyser les compromis entre les différentes modalités selon les objectifs en lien avec les indicateurs (section 4.2.2).



Tableau 18. Matrice d'évaluation intégrant les intervalles de préférence (vert), d'inconfort (jaune) et de rejet (rouge)

Scénarios	Indicateurs et Périodes	Niveaux de récolte moyen (m <sup>3</sup> /an)			Pourcentage de la superficie forestière en échec de régénération (%)			Portion de la récolte provenant des bois brûlés (%)			Superficie moyenne plantée annuellement (ha)		
		RCP	Historique	RCP 4.5	RCP 8.5	Historique	RCP 4.5	RCP 8.5	Historique	RCP 4.5	RCP 8.5	Historique	RCP 4.5
Statu quo	2020 - 2050	6 240 704	3 685 506	2 077 021	1%	4%	3%	12%	71%	84%	17 945	19 021	18 658
	2051 - 2075	7 140 787	3 794 267	2 181 075	1%	10%	11%	8%	82%	83%	15 629	20 100	20 100
	2076 - 2120	6 611 750	4 014 877	2 288 178	2%	19%	25%	9%	67%	79%	14 395	20 100	20 100
	2121 - 2170	6 528 624	4 267 888	2 496 041	3%	28%	38%	11%	38%	58%	15 713	20 100	20 100
Intensif	2020 - 2050	7 631 472	5 556 630	3 060 931	0%	2%	2%	11%	44%	78%	38 259	51 836	36 851
	2051 - 2075	8 313 743	5 513 926	3 234 274	0%	7%	8%	7%	54%	81%	26 117	44 181	50 653
	2076 - 2120	7 075 474	5 360 662	3 199 945	1%	14%	19%	7%	36%	74%	29 753	47 587	56 719
	2121 - 2170	7 162 519	5 635 537	3 197 532	1%	21%	29%	13%	26%	49%	28 195	45 420	52 533
Intensif_F50	2020 - 2050	7 500 692	5 888 581	3 820 348	0%	2%	2%	11%	47%	68%	37 564	46 651	40 075
	2051 - 2075	8 211 570	5 903 769	3 995 346	1%	7%	7%	7%	44%	82%	26 196	41 271	52 662
	2076 - 2120	7 072 322	5 761 068	3 955 604	1%	11%	14%	7%	32%	65%	27 883	47 366	54 751
	2121 - 2170	7 314 333	6 168 369	4 107 319	1%	13%	18%	12%	22%	32%	28 154	41 798	51 292
Intensif_F50_Plant2	2020 - 2050	7 620 185	5 967 500	3 910 841	0%	1%	1%	12%	42%	68%	44 272	58 057	54 003
	2051 - 2075	8 326 704	6 035 906	4 139 909	0%	5%	3%	6%	44%	80%	32 339	57 189	57 535
	2076 - 2120	7 148 825	6 058 382	4 083 925	0%	7%	8%	7%	30%	66%	31 317	51 246	64 702
	2121 - 2170	7 492 227	6 487 404	4 367 095	0%	8%	10%	11%	25%	33%	31 101	47 432	53 430
Intervalles	Préférence		plus 6,0 (+- 5%)		moins de 3%				moins de 10%			moins de 35000	
	Inconfort		5,5 à 5,9 (+- 10%)		3 à 5 %				10 à 25 %			35000 à 40000	
	Rejet		moins de 5,5		plus 5%				plus 25 %			plus de 40000	



## 4.2.2. Analyses des compromis entre les différentes modalités d'adaptation

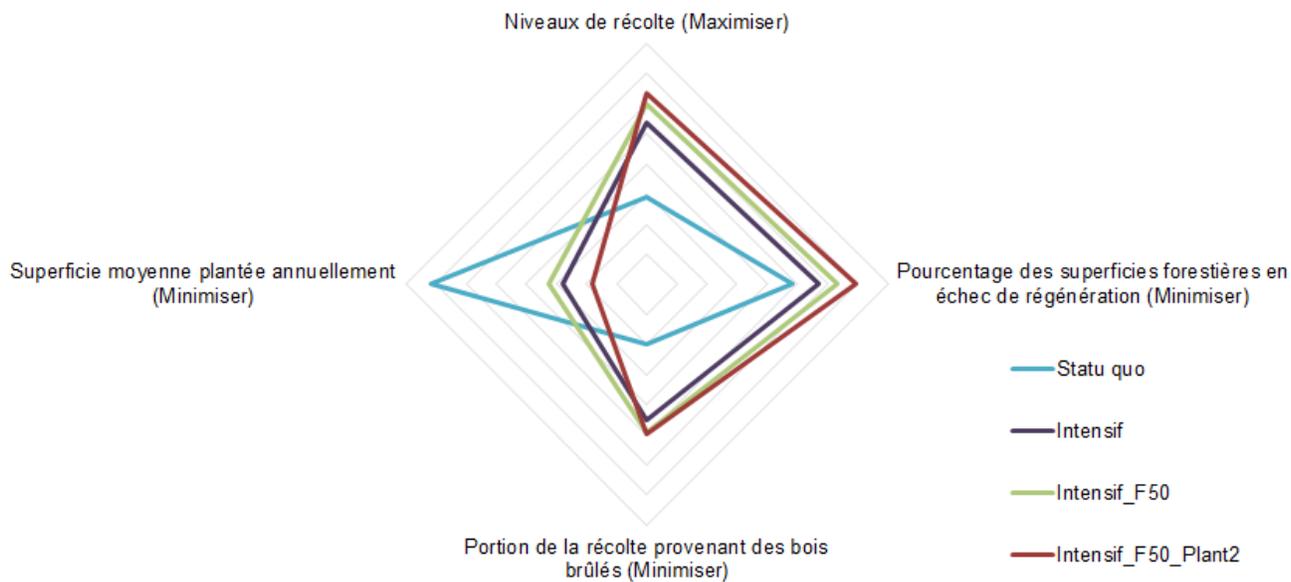
En comparant les modalités sous RCP 4.5 (Figure 33a) et RCP 8.5 (Figure 33b), les résultats pour chaque indicateur se classent sensiblement dans le même ordre pour chaque modalité. La différence est que le RCP 8.5 rend plus difficile l'atteinte des objectifs fixés pour chaque indicateur.

La modalité d'adaptation permettant de maximiser les niveaux de récolte, soit la modalité *Intensif\_F50\_Plant2* sur tout l'horizon de planification est celle qui demande le plus d'effort de plantation (Figure 33a et Figure 33b). Ce résultat démontre que la faisabilité d'un tel scénario est peut-être irréaliste dans la mesure où comparativement au scénario *statu quo*, où la cible de plantation représente ce qui est fait actuellement dans la région, la superficie plantée augmente significativement, ce qui va à l'encontre de l'objectif de minimisation de cet indicateur.

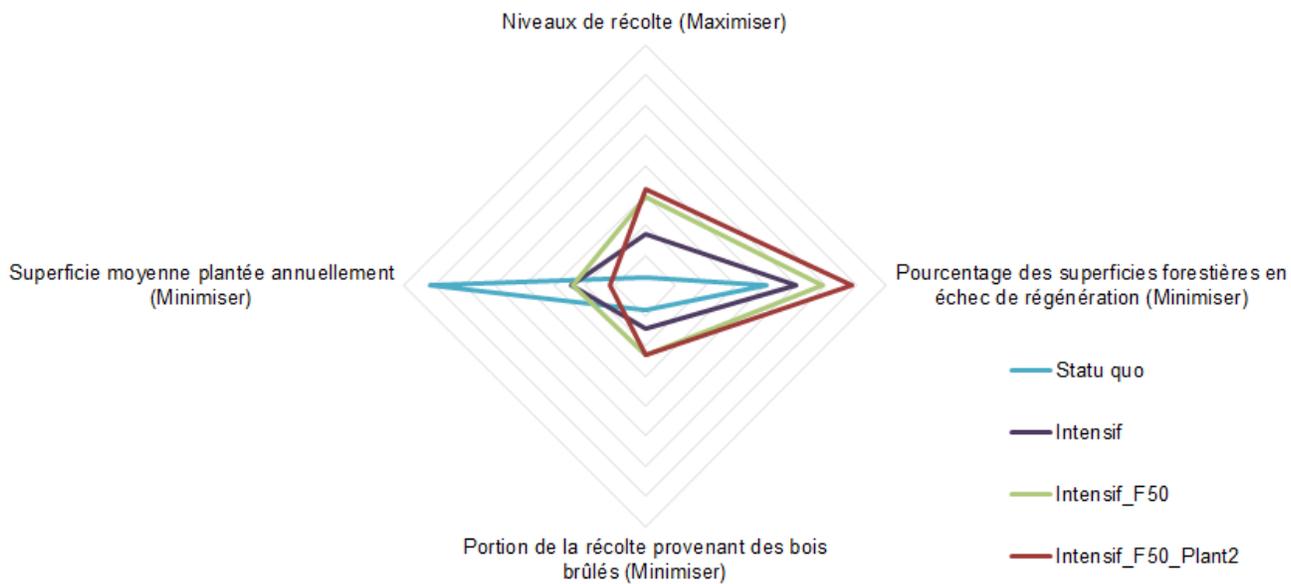
Les modalités intégrant le plus d'enrichissement en feuillus permettent de diminuer le pourcentage de superficie forestière en échec de régénération, donc d'améliorer l'objectif de minimisation de cet objectif. Finalement, dans les scénarios intensifs, la proportion de la récolte provenant des bois brûlés diminue comparativement au scénario *statu quo*.



**a) Variation des indicateurs selon les objectifs sous scénario RCP 4.5**



**b) Variation des indicateurs selon les objectifs sous scénario RCP 8.5**



**Figure 33. Variation des indicateurs selon les modalités d'adaptations testées a) sous RCP 4.5 et b) sous RCP 8.5.**

### 4.2.3. Classement des modalités d'adaptation

À défaut d'utiliser une méthode d'agrégation multicritère adaptée au contexte, la procédure d'agrégation utilisée est relativement simple. Elle a consisté à attribuer un pointage à chaque valeur d'indicateur (section 3.3.2.5), par scénario climatique et par période de temps, sur chaque modalité d'adaptation (Tableau 19). Les poids des indicateurs et des périodes de temps ont été considérés égaux aux fins de l'exercice.

L'interprétation de ces résultats montre que les deux modalités d'adaptation les plus intensives donnent des résultats assez semblables quant à leurs pointages respectifs. Puisque le pointage global idéal serait de 16, il est possible de conclure qu'aucune des modalités testées n'est la plus performante au niveau de tous les indicateurs. Un compromis serait donc nécessaire pour pouvoir retenir une seule modalité.

**Tableau 19. Pointage des modalités selon le scénario climatique et la période de temps**

Scénarios	Temps	RCP 4.5						RCP 8.5					
		Niveaux de récolte	Échecs de régénération	% bois brûlé récupéré	Plantation annuelle	Score par période de temps	Score pour le scénario	Niveaux de récolte	Échecs de régénération	% bois brûlé récupéré	Plantation annuelle	Score par période de temps	Score pour le scénario
Statu quo	2020 - 2050	4	2	3	1	10	45	3	2	3	1	9	41
	2051 - 2075	4	3	3	1	11		4	3	1	1	9	
	2076 - 2120	4	4	3	1	12		3	4	3	1	11	
	2121 - 2170	4	4	3	1	12		4	4	3	1	12	
Intensif	2020 - 2050	3	1	1	3	8	39	2	1	2	2	7	35
	2051 - 2075	3	2	2	3	10		3	2	1	2	8	
	2076 - 2120	3	3	2	2	10		2	3	2	3	10	
	2121 - 2170	3	3	2	3	11		3	3	2	2	10	
Intensif_50	2020 - 2050	2	1	2	2	7	28	1	1	1	3	6	27
	2051 - 2075	2	2	1	2	7		2	2	1	3	8	
	2076 - 2120	2	2	1	2	7		1	2	1	2	6	
	2121 - 2170	2	2	1	2	7		2	2	1	2	7	
Intensif_F50_Plant2	2020 - 2050	1	1	1	4	7	27	1	1	1	4	7	26
	2051 - 2075	1	1	1	4	7		1	1	1	4	7	
	2076 - 2120	1	1	1	3	6		1	1	1	4	7	
	2121 - 2170	1	1	1	4	7		1	1	1	2	5	

Le Tableau 20 permet de visualiser la plage de variabilité des évaluations sur les indicateurs, par scénario climatique et modalité d'adaptation. Ce dernier tableau combiné au pointage des modalités peut permettre d'éclairer les décideurs quant aux modalités les plus performantes et les potentiels impacts des changements climatiques.

**Tableau 20. Variabilité des indicateurs selon le scénario climatique et les modalités d'adaptation**

Modalités	Indicateurs Scénarios	Niveaux de récolte		Échecs de régénération		% bois brûlé récupéré		Plantation annuelle	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Statu quo	Historique	6 240 704	7 140 787	1%	3%	8%	12%	14 395	17 945
	RCP 4.5	3 685 506	4 267 888	4%	28%	38%	82%	19 021	20 100
	RCP 8.5	2 077 021	2 496 041	3%	38%	58%	84%	18 658	20 100
Intensif	Historique	7 075 474	8 313 743	0%	1%	7%	13%	26 117	38 259
	RCP 4.5	5 360 662	5 635 537	2%	21%	26%	54%	44 181	51 836
	RCP 8.5	3 060 931	3 234 274	2%	29%	49%	81%	36 851	56 719
Intensif_F50	Historique	7 072 322	8 211 570	0%	1%	7%	12%	26 196	37 564
	RCP 4.5	5 761 068	6 168 369	2%	13%	22%	47%	41 271	47 366
	RCP 8.5	3 820 348	4 107 319	2%	18%	32%	82%	40 075	54 751
Intensif_F50_Plant2	Historique	7 148 825	8 326 704	0%	0%	6%	12%	31 101	44 272
	RCP 4.5	5 967 500	6 487 404	1%	8%	25%	44%	47 432	58 057
	RCP 8.5	3 910 841	4 367 095	1%	10%	33%	80%	53 430	64 702

### 4.3. Prise en compte et intégration des différents points de vue dans le projet

Les conditions de réalisation d'un projet tel que celui-ci et celles qui devraient avoir cours en situation réelle sont très différentes. Dans la situation où l'objet porte sur le devenir d'un bien collectif, en l'occurrence le milieu forestier et les services environnementaux qu'il fournit à la société, le niveau décisionnel, qu'il soit stratégique, tactique ou



opérationnel, revêt une grande importance. En effet, dans la perspective où une région désire implanter une stratégie d'aménagement visant à préparer l'adaptation de la forêt à des conditions climatiques futures, celle-ci devient une partie intéressée incontournable dans le processus. Au même titre, les autres acteurs régionaux, tels que les industriels forestiers et le milieu municipal, les responsables gouvernementaux, notamment ceux qui décident des fonds alloués ou ceux qui pourraient être affectés, tels que la protection des forêts ou la production de plants pour le reboisement, devraient faire partie du processus dès l'initiation des travaux. Cette condition est primordiale pour l'appropriation des scénarios et des risques associés par tous et pour le développement d'une vision partagée afin d'y faire face. Il en va même de l'acceptabilité sociale des actions qui pourraient être implantées.

Dans le cadre du projet, des responsables aménagistes de la région ont été impliqués, mais de façon plutôt restreinte. Ils ont eu l'occasion d'exprimer leurs attentes et leurs préoccupations et celles-ci ont été intégrées dans la mesure du possible. Toutefois, il a été remarqué que le niveau de perception quant à la portée du projet était différent. En effet, le projet a été réalisé dans une perspective stratégique à long terme alors que les préoccupations légitimes des aménagistes se situaient plus souvent aux niveaux tactique et opérationnel.

L'implication des divers décideurs dans un tel projet n'est probablement pas la même pour tous. Il est souhaitable qu'elle soit structurée en fonction des niveaux de responsabilités sur les plans stratégique, tactique et opérationnel et élargi pour les suites du projet.

## 4.4. Forces et limites à l'interprétation

Les travaux présentés dans ce rapport représentent des avancées importantes au niveau de l'intégration des changements climatiques à la détermination des possibilités forestières. Toutefois, il est important de souligner les limites à l'interprétation des résultats de ces travaux. Ce projet a été conçu dans le but de développer une approche et un modèle, les forces et les limites permettent de mieux cerner la pertinence des développements futurs possibles.

### 4.4.1. Forces

Certains aspects du projet représentent des développements importants en matière d'aide à la décision en aménagement forestier durable, notamment :

- l'intégration au Bureau du forestier en chef des changements climatiques à une modélisation de l'aménagement forestier
- l'intégration de plusieurs perturbations naturelles et de l'aménagement forestier au sein du même modèle
- la possibilité de tester des modalités d'adaptation
- la mise au point, en parallèle au développement du modèle de simulation, d'un outil d'aide à la décision
- l'intégration des bases de données du Forestier en chef à la simulation d'impacts et d'adaptations aux changements climatiques
- une prise en compte, sous la forme des trois scénarios climatiques, de l'incertitude liée aux changements climatiques
- l'identification de défis potentiels majeurs en matière d'aménagement forestier sous changements climatiques pour la région :
  - l'impact des feux sur la forêt
  - les échecs de régénération et les pertes de superficie productive
  - la perte de productivité des essences de la région à long terme et
  - le degré de mésadaptation de la stratégie actuelle, étant donné les changements anticipés
- l'identification des besoins en connaissance.

### 4.4.2. Limites à l'interprétation

Malgré les développements importants nécessaires pour les suites du projet, les limites à l'interprétation des



résultats du projet doivent être soulignées. Le projet représente une première tentative de modélisation des impacts des changements climatiques au Bureau du forestier en chef. Cette première modélisation a permis une exploration du sujet et généré de nombreux apprentissages. Les résultats présentés dans ce rapport ne devraient pas servir à informer les acteurs de l'aménagement forestier quant aux gestes immédiats à poser sur le terrain. L'approche devra être travaillée davantage, par exemple en testant un plus grand nombre de modalités d'adaptation, mais aussi en s'assurant de poursuivre les développements potentiels identifiés dans le rapport (section 5), avant qu'une contribution à la prise de décision en aménagement forestier, autant au niveau opérationnel que stratégique, soit envisageable. Ceci dit, les résultats indiquent que des efforts devront être déployés de la part des instances du gouvernement et des acteurs du milieu forestier afin de rechercher les meilleurs scénarios sylvicoles possible afin d'assurer la résilience de la forêt face aux changements climatiques au Saguenay–Lac-Saint-Jean. Mise à part la nature exploratoire du projet, les facteurs suivants limitent la portée des conclusions qui pourront être tirées des résultats du projet :

- plusieurs éléments n'ont pas été pris en compte, par exemple les contraintes à l'aménagement autres que les vieilles forêts, les ravageurs autres que la tordeuse, le chablis, les maladies des arbres et les espèces envahissantes
- dans plusieurs cas, comme pour les feux et la tordeuse, une seule source de connaissances scientifiques a été intégrée au modèle, une triangulation par de multiples sources devient essentielle
- les faisabilités opérationnelles et financières des mesures d'adaptation développées n'ont pas été testées
- l'exercice a été développé pour une seule région
- un nombre limité de modalités d'adaptation a été testé et
- le modèle comporte un nombre limité de traitements sylvicoles.

## 5. Perspectives

Dans le cadre du projet, l'intention n'a pas été de solutionner tous les défis soulevés par les résultats de la modélisation, mais plutôt de tenter, pour une première fois, d'échafauder un processus qui permettra éventuellement d'estimer l'impact potentiel des changements climatiques et des perturbations naturelles sur les possibilités forestières en vue d'éclairer la détermination. Étant une première tentative, plusieurs avenues de développement ont été identifiées. Les sections suivantes soulignent les développements qui sauront alimenter l'amélioration continue des travaux entrepris en intégration des changements climatiques et des perturbations naturelles à la détermination des possibilités forestières.

### 5.1. Généralités

Pour la suite des travaux, il sera important de mieux intégrer l'incertitude aux travaux d'analyse. Le projet a su inclure l'incertitude liée aux climats futurs en intégrant trois scénarios climatiques, mais une intégration plus complète de l'incertitude liée à certains facteurs, telle la variabilité des feux à l'échelle régionale, fournira une image plus complète des risques et des vulnérabilités associés aux perturbations naturelles et aux changements climatiques.

Ayant mieux intégré les diverses sources d'incertitude, les gammes nécessairement plus larges de réponses aux perturbations et aux changements climatiques devront être intégrées au processus d'aide à la décision. À ce niveau, l'analyse financière qui cherche à soutenir la prise de décision dans le domaine de l'investissement face à la volatilité des marchés et l'incertitude à plus long terme promet de fournir des pistes utiles. L'analyse financière permettrait aussi une évaluation structurée des coûts et des bénéfices associés aux différentes stratégies d'aménagement, y compris ceux engendrés par les différentes modalités d'adaptation, le tout sous changements climatiques.

Afin de bien atterrir les futurs développements avec les recherches dans le domaine et s'assurer d'une cohérence



avec les stratégies d'aménagement, il sera nécessaire d'arrimer l'approche avec les autres instances au sein du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, tout en continuant les partenariats avec les différents chercheurs dans leurs domaines respectifs.

Pour exporter l'approche développée par ce projet aux autres régions du Québec, il sera nécessaire d'intégrer les processus spécifiques à la forêt feuillue, la dynamique de cette forêt étant fondamentalement différente de celle retrouvée en forêt boréale. Ces processus distincts sont liés à la nature même des écosystèmes (essences feuillues, dynamique par trouées), à l'aménagement de ces forêts (coupes partielles, coupes progressives, coupes de jardinage, éclaircies commerciales) et aux perturbations naturelles (chablis, insectes ravageurs spécifiques à la forêt feuillue, maladies telle la maladie corticale du hêtre).

## 5.2. Aide à la décision

Dans le domaine des sciences de la décision, l'évaluation des procédures d'agrégation existantes est nécessaire pour tenir compte à la fois du temps et de l'incertitude en permettant de procéder à la synthèse d'une grande quantité d'informations.

Un important développement méthodologique est aussi à prévoir pour inclure les systèmes de préférences des décideurs éventuellement impliqués, tels que les planificateurs de l'aménagement régional, afin de parvenir à des décisions concertées. L'appropriation de la démarche par l'ensemble des décideurs est également à prévoir. Les travaux dans le domaine sont donc à poursuivre ultérieurement.

## 5.3. Feux

Les feux s'avérant d'une importance cruciale dans le projet, il sera pertinent de développer cet aspect de la modélisation. Les éléments suivants pourront être développés davantage lors de la suite des travaux :

- créer de multiples réalisations des séquences de feux futurs qui respectent les sauts d'échelle entre les zones de feu homogènes et la zone d'étude
- raffiner les probabilités d'initiation des feux en fonction de l'historique des feux, mais aussi de la topographie, des patrons climatiques à l'échelle de la région et des infrastructures anthropiques
- intégrer l'effet de la configuration spatiale des combustibles sur les régimes de feu
- intégrer le contrôle des feux à la modélisation
- moduler la régénération et la récupération en fonction de la sévérité des feux et
- diversifier les sources d'information quant aux régimes de feu sous changements climatiques.

## 5.4. Aménagement forestier

Au niveau de l'aménagement forestier, plusieurs avenues de développement se présentent :

- développer de nouvelles modalités d'adaptation (par exemple, la création de nouvelles strates pour la ligniculture, plantation de résineux à maturité plus hâtive tel le pin gris)
- travailler la répartition spatiale de l'aménagement forestier pour qu'il réponde mieux sur l'ensemble des indicateurs retenus
- intégrer les coupes partielles et les autres traitements pratiqués en forêt mixte et feuillue
- peaufiner l'effet des changements climatiques sur la récupération des bois brûlés (par exemple, le longicorne)
- s'inspirer des solutions fournies par Woodstock<sup>16</sup> pour l'implémentation de solutions dans BFEC-CC
- améliorer la modélisation des chemins et de l'accès au territoire et

<sup>16</sup> Woodstock est un outil de modélisation commercial créé par Remsoft Inc. qui permet à l'utilisateur de formuler un problème de programmation linéaire pour l'aménagement forestier.



- utiliser un scénario pour les zones d'aménagement intensif qui sera produit de concert avec les aménagistes de la région.

## 5.5. Régénération / Répartition des essences

Dans le cadre du projet, les échecs de régénération se sont avérés d'une très grande importance. Les modalités d'adaptation entraînant un enrichissement en feuillus ont donné des résultats intéressants, entre autres pour le contrôle de la superficie en échec de régénération.

La migration assistée, pour laquelle peu de données empiriques étaient disponibles au moment de l'élaboration du modèle, mérite d'être examinée et intégrée comme un élément de solution au maintien de la superficie productive.

Aussi, il sera intéressant d'améliorer la modélisation de la régénération naturelle en intégrant l'ensemencement de la superficie perturbée, l'effet des changements climatiques sur l'établissement de la régénération et l'effet de la coupe de récupération sur la régénération par graines.

Pour mieux prendre en compte l'effet de la productivité du site (qui est variable sous changements climatiques) sur la production de propagules, des critères basés sur la croissance et le rendement pourront être utilisés au lieu de l'âge dans la détermination de la maturité reproductive.

Dans la modélisation développée pour le projet, les successions forestières ne dépendent pas du climat en tant que tel. Il sera pertinent pour la suite de rendre la succession forestière sensible aux conditions climatiques.

## 5.6. Insectes ravageurs et pathogènes

Dans le contexte du projet, l'intégration de la défoliation est relativement simple : un seul insecte, la tordeuse, a été modélisé et son effet sur la forêt se limite à la réinitialisation du peuplement (une perturbation d'origine). Pour la suite, il sera sans doute pertinent d'inclure d'autres effets du passage de la tordeuse (par exemple, sur l'inflammabilité et la productivité des peuplements) et d'ajouter d'autres insectes ravageurs et des pathogènes à la modélisation.

## 5.7. Productivité

Dans le projet, un nombre limité d'essences a été intégré à l'exercice de modélisation de l'impact des changements climatiques sur la productivité forestière (Power et Auger, 2019). En élargissant le nombre d'essences modélisé et le nombre de régions à l'étude, il deviendra nécessaire de modéliser la productivité sous changements climatiques d'essences additionnelles. Il y aura lieu aussi de raffiner la modélisation de la mortalité et du recrutement dans le cadre de ces modélisations. Le recrutement sera un élément important également à considérer. Il faudra que la prévision du nombre et de l'espèce des nouveaux arbres qui viennent remplacer les arbres coupés dans le peuplement soit sensible au climat.

Comme le déficit hydrique pourrait s'avérer d'une très grande importance pour la région, il sera utile d'intégrer les effets de la sécheresse sur la croissance et la mortalité des arbres.

## 6. Exportation du modèle vers d'autres régions

Tel quel, le modèle de simulation pourrait être exporté vers les autres régions boréales du Québec (Abitibi-Témiscamingue, Nord-du-Québec et Côte-Nord) en adaptant l'inventaire forestier, les strates et les modalités associés aux stratégies d'aménagement en vigueur. Les ajustements nécessaires pour que la méthode développée dans le contexte de ce projet soit transposable ailleurs au Québec ou au Canada ont été identifiés. Certains éléments du modèle pourraient être exportés tels quels (section 6.1) et certains éléments devront être adaptés ou remplacés (section 6.2).



## 6.1. Éléments pouvant être exportés intégralement

Les éléments suivants devront pouvoir être exportés, peu importe le contexte :

- l'approche itérative d'apprentissage et de développement de scénarios (section 3.3)
- l'approche d'aide à la décision
- le cadre général pour la modélisation des strates d'aménagement
- le système de transition après perturbation et
- pour les écosystèmes où le feu est présent : la modélisation des feux sous les différents scénarios climatiques.

## 6.2. Éléments devant être adaptés ou remplacés

Les éléments suivants devront être modifiés ou adaptés pour produire des résultats interprétables dans d'autres contextes :

- les types de perturbations naturelles (chablis, insectes autres que la tordeuse, maladies)
- la coupe forestière (ajout de la coupe partielle, de la coupe de jardinage et des coupes progressives)
- autres traitements sylvicoles (ajout des éclaircies commerciales, rétention variable)
- les tableaux de volume marchand par groupe d'essences
- les transitions après perturbation et
- le choix des indicateurs pour qu'ils soient davantage arrimés aux enjeux locaux.

Des plans sont en cours pour étendre la modélisation des impacts et des adaptations des changements climatiques à l'ensemble de la forêt du Québec.



## Conclusion

Ce projet a permis de démontrer qu'il est possible de modéliser les différentes interactions des événements climatiques futurs avec l'aménagement forestier à l'échelle régionale. Les connaissances scientifiques les plus à jour et l'aide des partenaires associés au projet ont été primordiales à sa réalisation. En plus d'identifier certains risques pour la forêt du Saguenay–Lac-Saint-Jean, certaines modalités d'adaptation potentielles ont pu être identifiées et testées. L'approche développée permet d'éclairer les décideurs grâce au processus d'aide à la décision qui permet de synthétiser les résultats du modèle. De plus amples développements seront nécessaires pour s'assurer que le processus d'aide à la décision puisse évoluer avec le modèle et cheminer en intégrant les divers paliers participant aux décisions.

Il est toutefois nécessaire de rappeler que le présent rapport fait état d'un projet qui avait pour but de développer une approche de modélisation pour la prise en compte de l'incertitude face aux changements climatiques dans le cadre de la détermination des possibilités forestières au Québec. Il a permis d'intégrer différents processus à la modélisation (l'aménagement forestier, les feux, la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la productivité des peuplements et les échecs de régénération) et d'évaluer les interactions parmi ces différents processus dans un contexte de changements climatiques.

De plus, des apprentissages sur plusieurs éléments du projet sont ressortis quant à la modélisation, aux impacts des changements climatiques sur l'aménagement forestier, à la sensibilité du modèle face à certaines modalités d'adaptation et au processus d'aide à la décision. Ce projet porte sur une seule région du Québec, les résultats ne peuvent être transposés directement vers d'autres régions sans refaire l'exercice à l'aide du modèle développé. Les sources de connaissances scientifiques sont à élargir, car pour certains processus modélisés une seule source scientifique est utilisée.

Pour la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, étant donné les suppositions du modèle, les résultats suggèrent que la forêt de demain sera différente de celle d'aujourd'hui. Des cycles de feu plus courts sont à prévoir et pourraient engendrer une importante perte de superficie forestière productive. Bien que certains gains en croissance des essences résineuses et feuillues soient attendus, ces derniers ne permettront pas de compenser l'effet des feux sur les possibilités forestières à long terme, d'où la nécessité de développer des modalités d'adaptation performantes.

Par ailleurs, les résultats obtenus amènent une réflexion plus large sur les façons d'intervenir dans la forêt et sur le devenir de celle-ci et des services environnementaux qu'elle procure à la société. Il y a lieu de s'interroger sur les compromis à faire pour assurer le maintien de vieilles forêts qui ont une forte probabilité de brûler. Un nécessaire arbitrage des valeurs devra être entrepris avec les acteurs du milieu afin d'assurer un futur acceptable. À la lumière des résultats présentés, il est possible de croire que la structure ainsi que la dynamique de la forêt seront appelées à changer sous changements climatiques et des adaptations dans les pratiques forestières seront à prévoir.

Par exemple, un enrichissement de la composition forestière en feuillus permettrait de diminuer l'inflammabilité de la forêt, mais aurait pour conséquence d'inverser les proportions résineuse et feuillue de la matrice forestière, ce qui demanderait une adaptation importante par l'industrie forestière qui n'aurait plus accès à son approvisionnement habituel.

De plus, la lutte terrestre aux feux de forêt et la récupération à grande échelle des bois brûlés reposent sur le maintien d'un accès constant à la forêt par un réseau routier développé adéquatement. Il n'est toutefois pas souhaité dans le cadre de la protection de l'habitat du caribou forestier.

Dans un tel contexte, le maintien de la stratégie d'aménagement actuelle sous changements climatiques risque de mener à des conditions forestières inacceptables quant à la pérennité de la ressource forestière. Bien que les résultats de certaines modalités d'adaptation, telles que l'intensification de l'aménagement et l'enrichissement en feuillus, démontrent qu'il est possible d'atténuer les impacts des changements climatiques, des actions doivent être entreprises aujourd'hui pour s'assurer que la forêt du futur soit à la hauteur des attentes de la collectivité. Il faut donc définir de façon collaborative une vision pour la forêt de demain et agir en conséquence rapidement.



En parallèle, il sera nécessaire d'approfondir les connaissances sur les impacts des changements climatiques et de les intégrer à la modélisation pour avoir un portrait plus clair du futur. Le rôle que pourra jouer la migration assistée dans un contexte d'adaptation devra être approfondi et testé sur le terrain. L'effet de traitements sylvicoles existants et novateurs sous changements climatiques devra aussi l'être. La forêt feuillue, avec ses dynamiques et ses traitements sylvicoles propres, devra être intégrée au processus. L'effet du contexte spatial sur l'initiation et la propagation des feux devra être mieux compris et intégré à la modélisation. L'incertitude liée à la stochasticité des perturbations naturelles et anthropiques et l'aspect multi décideurs devront aussi être intégrés au processus décisionnel. Pour la suite des travaux, il sera important de continuer de développer et de tester différentes modalités d'adaptation en collaboration avec les planificateurs de l'aménagement forestier de la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, tout en généralisant le modèle aux autres régions du Québec.

Finalement, les résultats soulignent l'importance de maintenir les efforts pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre, car les résultats des simulations sous le scénario RCP 8.5 laissent présager une situation difficilement soutenable pour la forêt et l'ensemble des services écosystémiques qu'elle fournit, dont le stockage du carbone. En effet, des pertes importantes de superficie forestière productive, telles que suggérées par les résultats, permettent d'anticiper une capacité de stockage amoindrie.

## Recommandation

Le Forestier en chef recommande la mise en commun des efforts de recherche et de développement entre les différents acteurs et chercheurs du milieu, autant au sein du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs qu'à l'externe pour permettre la recherche de solutions novatrices afin d'adapter la forêt, le milieu forestier et les pratiques forestières aux changements climatiques. Cette mise en commun pourrait permettre de sauver du temps quant à la mise en œuvre de nouvelles stratégies, mais aussi permettre des économies si les efforts de recherche sont bien coordonnés. Le Forestier en chef continuera l'intégration de ces nouvelles connaissances dans ses travaux.



## Références

- Auger, I. 2017. Natura-2014 : Mise à jour et évaluation du modèle de croissance forestière à l'échelle du peuplement. Note de recherche forestière N° 147. Sainte-Foy, Québec : Direction de la recherche forestière, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. 32 pages.
- Bana e Costa, C. A. 1996. Les problématiques de l'aide à la décision : Vers l'enrichissement de la Trilogie Choix – Tri – Rangement. Recherche Opérationnelle 30(2) : 191 – 216.
- Bernier, P.Y., Gauthier, S., Jean, P.O., Manka, F., Boulanger, Y., Beaudoin, A. et Guindon, L. 2016. Mapping local effects of forest properties on fire risk across Canada. *Forests*. doi/10.3390/f7080157.
- Bertrand, L. 2001. Aménagement durable des forêts publiques : Une démarche participative multicritère. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval.
- Bouchard, M., Boucher, Y., Belleau, A. et Boulanger, Y. 2015. Modélisation de la variabilité naturelle de la structure d'âge des forêts du Québec. Mémoire de recherche forestière N° 175. DRF-MFFP: Québec, Qc.
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Gray, D.R., Le Goff, H., Lefort, P. et Morissette, J. 2013. Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada. *Can. J. For. Res.* 23: 904-923.
- Boulanger, Y., Gauthier, S. et Burton, P.J. 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, P.Y., Gauthier, S., Beaudoin, A. et 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. *Can. J. For. Res.* 47: 755-764.
- Box, G.E.P. 1976. Science and statistics. *J. Am. Stat. Assoc.* 71: 791-799.
- Bureau du forestier en chef. 2013. Optimisation. Fascicule 2.6. Bureau du forestier en chef. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc, pp. 67-69.
- Bureau du forestier en chef. 2018a. Strates d'aménagement. Fascicule 2.2. Manuel de détermination des possibilités forestières 2018-2023. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc, 5 p.
- Bureau du forestier en chef. 2018b. Structure d'âge. Fascicule 4.1. Manuel de détermination des possibilités forestières 2018-2023. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc, 9 p.
- Côté, D. 2003. Expansion des milieux ouverts à lichens dans le domaine de la pessière à mousses, dans P. Grondin et A. Cimon, coordonnateurs. Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier, p. 175-190.
- Côté, D. 2004. Mise en place des landes forestières dans le domaine des forêts commerciales d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP.) et potentiel de ces milieux pour la production forestière. Chicoutimi, Québec, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 107 p.
- Côté, D. et R. Gagnon. 2002. Régression des forêts commerciales d'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] BSP.) à la suite de feux successifs. Actes du Colloque L'aménagement forestier et le feu, tenu les 9 et 10 avril 2002 à Chicoutimi (Québec). Ministère des Ressources naturelles, Direction de la conservation des forêts, 162 p.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P. et Howard, T. 2005. Problem Identification and Decision Analysis. In *Forest Management to Sustain Ecological, Economic, and Social Values*, Fourth. Waveland Press, Long Grove, pp. 259–316.
- Direction de la gestion des forêts du Saguenay–Lac-Saint-Jean. 2018. Stratégie régionale de production de bois. Saguenay, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 98 p.
- D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L., Phillips, R.P., Bergeron, Y. et Kneeshaw, D.D. 2018. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications*. 9:3213. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4>.
- Environnement Canada. 2011. Évaluation scientifique aux fins de la désignation de l'habitat essentiel de la population boréale du caribou des bois (*Rangifer tarandus caribou*) au Canada. Mise à jour 2011, 116 p. et annexes.



- Erni, S., Arsenault, D. et Parisien, M.A. 2018. Stand age influence on potential wildfire ignition and spread in the boreal forest of northeastern Canada. *Ecosystems*. doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3.
- Fall, A. et Fall, J. 2001. A domain-specific language for models of landscape dynamics. *Ecol. Model.* 141: 1-18.
- Fall, A., Fortin, M.J., Kneeshaw, D.D., Yamasaki, S.H., Messier, C., Bouthillier, L. et Smyth, C. 2004. Consequences of various landscape-scale ecosystem management strategies and fire cycles on age-class structure and harvest in boreal forests. *Can. J. For. Res.* 34: 310–322.
- Flannigan, M. D., K. A. Logan, B. D. Amiro, W. R. Skinner, et B. J. Stocks. 2005. Future area burned in Canada. *Climatic Change* 72:1–16.
- Flannigan, M. D. et Wotton, B. M. 2001. Climate, weather and area burned. Dans Johnson, E. A. et Miyanishi, K. (éditeurs), *Forest Fires: Behavior & Ecological Effects*. Academic Press. pp. 335–357.
- Gauthier, S., Bernier, P., Burton, P.J., Edwards, J., Isaac, K., Isabel, N., Jayen, K., LeGoff, H. et Nelson, E.A. 2014. Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environ. Rev.* 22: 256-285. doi: 10.1139/er-2013-0064.
- Gauthier, S., Bernier, P.Y., Boulanger, Y., Guo, J., Guindon, L., Beaudoin, A. et Boucher, D. 2015. Vulnerability of timber supply to projected changes in fire regime in Canada's managed forests. *Can. J. For. Res.* 45: 1439-1447.
- GIEC. 2014: Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p. Les graphiques sont disponibles sur le site Web du GIEC : <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W. et Flannigan, M.D. 2004. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophys. Res. Lett.* 31: L18211. doi: 10.1029/2004GL020876.
- Girard, F., S. Payette et R. Gagnon. 2008. Rapid expansion of lichen woodlands within the closed-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by disturbances in Eastern Canada. *Journal of Biogeography*, 35: 529-537.
- Girard, F., S. Payette et R. Gagnon. 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone in eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 291-303.
- Girardin, M.P. et Mudelsee, M. 2008. Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecol. Applic.* 18: 391-406.
- Han, E.N. et Bauce, E. 1998. Timing of diapause initiation, metabolic changes and overwintering survival of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana*. *Ecological Entomology* 23(2): 160-167.
- Hanes, C.C., Xianli, W., Jain, P., Parisien, M.A., Little, J.M. et Flannigan, M.D. 2019. Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Can. J. For. Res.* 49: 256-269. dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0293.
- Hogg, E.H. et Bernier, P.Y. 2005. Climate change impacts on drought-prone forests in western Canada. *For. Chron.* 81: 675-682. <https://doi.org/10.5558/tfc81675-5>.
- Johnstone, J.F., Hollingsworth, T.N., Chapin, F.S., and Mack, M.C. 2010. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest. *Glob. Change Biol.* 16(4): 1281–1295. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02051.x.
- Kangas, J. et Pukkala, T. 1992. A decision theoretic approach applied to goal programming of forest management. *Silva Fennica*, vol. 26 no. 3 article id 5484. <https://doi.org/10.14214/sf.a15645>.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. et Bush, E. 2008. From impacts to adaptation : Canada in a changing climate 2007. Ottawa, Ont. : Ressources naturelles Canada, 448 pages.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolströma, M., Lexer, M.J. et Marchetti, M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259 : 698-709.
- Martel, J. M. 1999. L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications. Communication présentée à la CORS - SCRO, WINDSOR, ONTARIO. [https://www.cors.ca/sites/default/files/bulletin/v33n1\\_1f.pdf](https://www.cors.ca/sites/default/files/bulletin/v33n1_1f.pdf).



- Mendoza, G. et R. Prabhu. 2003. Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management. *Forest Ecology and Management*, 174 : 329-343. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00044-0.
- MFFP. 2015. Norme de stratification écoforestière. Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Sainte-Foy, Québec. 111 pages.
- MFFP. 2016. La tordeuse des bourgeons de l'épinette. <http://mffp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectestordeuse.jsp> (consulté le 15 novembre 2020).
- MFFP. 2020. Aménagement durable des forêts. <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/amenagement-durable-forets/> (consulté le 30 novembre 2020).
- Mitton, J.B. et Ferrenberg, S.M. 2012. Mountain pine beetle develops an unprecedented summer generation in response to climate warming. *Am. Nat.* 179 : E163-71. doi: 10.1086/665007.
- Munda, G. 2004. Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences. *European J. of Operational Research*, 158(3): 662-677. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00369-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00369-2).
- Nappi et coll. 2011. La récolte dans les forêts brûlées : enjeux et orientations pour un aménagement écosystémique. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction de l'environnement et de la protection des forêts. 51p.
- Payette, S. et A. Delwaide. 2003. Shift of Conifer Boreal Forest to Lichen – Heath Parkland Caused by Successive Stand Disturbances, *Ecosystems*, 6 : 540-550.
- Payette, S., N. Bhiry, A. Delwaide et M. Simard. 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada : the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 30 : 288-305.
- Périé, C. et de Blois, S. 2016. Dominant forest tree species are potentially vulnerable to climate change over large portions of their range even at high latitudes. *PeerJ* 4:e2218; DOI 10.7717/peerj.2218.
- Power, H. 2016. Comparaison des biais et précision des estimations de surface terrière totale, avec et sans coupe partielle, des modèles Artémis-2009 et Artémis 2014 sur une période de 40 ans. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 143. 21 p.
- Power, H. et Auger, I. 2019. Utilisation du modèle Artémis pour développer une méthode de simulation du changement de productivité des forêts associé aux changements climatiques. Avis technique SSRF-18. Direction de la recherche forestière, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Sainte-Foy, Québec. 15 pages.
- Régnière, J., St-Amant, R. et Duval, P. 2012. Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biological Invasions* 14(8): 1571-1586. 10.1007/s10530-010-9918-1.
- Régnière, J., Delisle, J., Sturtevant, B.R., Garcia, M. et Saint-Amant, R. 2019. Modeling migratory flight in the spruce budworm: temperature constraints. *Forests*. 10: 802. doi: 10.3390/f10090802.
- Roy, B. 1985. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Économica*, 423 pages.
- Roy, B. 1992. Science de la décision ou science de l'aide à la décision? *Revue internationale de systémique*, Vol. 6, N° 5, pp. 497–529.
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C.L., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Butchart, S.H.M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K.M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W.B., Martin, T.G., Mora, C., Bickford, D. et Watson, J.E.M. 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*. 354 : aaf7671-1-11.
- Splawinski, T.B., Cyr, D., Gauthier, S., Jetté, J.P. et Bergeron, Y. 2019a. Analyzing risk of regeneration failure in the managed boreal forest of northwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*. 49: 680-691.
- Splawinski, T.B., Greene, D.F., Michaletz, S.T., Gauthier, S., Houle, D., et Bergeron, Y. 2019b. Position of cones within cone clusters determines seed survival in black spruce during wildfire. *Canadian Journal of Forest Research*, 49: 121-127.



- Stocks, B.J., Fosberg, M.A., Lynham, T.J., Mearns, L., Wotton, B.M., Yang, Q., Jin, J.-Z., Lawrence, K., Hartley, G.R., Mason, J.A. et McKenney, D. 1998. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Clim. Change*, 38: 1–13. doi: 10.1023/A:1005306001055.
- Stocks, B.J., Mason, J.A., Todd, J.B., Bosch, E.M., Wotton, B.M., Amiro, B.D., Flannigan, M.D., Hirsch, K.G., Logan, K.A., Martell, D.L. et Skinner, W.R. 2003. Large forest fires in Canada, 1959–1997. *J. Geophys. Res.* 108(D1): 8149. doi: 10.1029/2001JD000484.
- Thompson, E.F. 1968. The theory of decision under uncertainty and possible applications in forest management. *Forest Science*. 14: 156-163.
- Tymstra, C., Bryce, R.W., Wooton, B.M., Taylor, S.W. et Armitage, O.B. 2010. Development and structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Edmonton, Alberta : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Rapport NOR-X-417. 102 p.
- Urli, B. 2013. Méthode omnicrotère – Méthode d'aide à la concertation, à la décision et à la gestion de projet. Rimouski : Université du Québec à Rimouski.
- Van Wagner, C.E. 1987. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Rapport technique 35. Ottawa, Ontario : Service canadien des forêts.
- Vincke, P. 1989. L'aide multicritère à la décision. Édition de l'Université de Bruxelles - Statistiques et mathématiques appliquées. 179 pages.
- Weintraub, A. et Abramovich, A. 1995. Analysis of uncertainty of future timber yields in forest management. *Forest Science*. 41: 217-234.
- Williamson, C.E., Saros, J.E., Vincent, W.F. et Smol, J.P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnol. Oceanogr.* 54 : 2273-2282.
- Yamasaki, S.H., Duchesneau, R., Doyon, F., Russell, J.S. et Gooding, T. 2008. Making the case for cumulative impacts assessment: Modelling the potential impacts of climate change, harvesting, oil and gas, and fire. *For. Chron.* 84: 349-368.
- Yousefpour, R., Jacobsen, J.B., Thorsen, B.J., Meilby, H., Hanewinkel, M. et Oehler, K. 2012. A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. *Annals of Forest Science*. 69: 1-15.

## Annexe : Liste des sorties du modèle BFEC-CC

Le tableau suivant présente les fichiers en sorties du modèle BFEC-CC, ainsi qu'une brève description de leur contenu.

Fichiers	Information contenue
<b>ageClassArea.txt</b>	Superficie (ha) par classe d'âge de 5 ans
<b>ageClassArea2.txt</b>	Superficie (ha) par zone, où l'âge est égal ou supérieur à 50 ans
<b>ageClassVol.txt</b>	Volume (m <sup>3</sup> ) par classe d'âge de 5 ans
<b>allZonesByAuReport.txt</b>	Rapport par UTA sur les contraintes (VF et taux de perturbation), qu'elles soient en vigueur ou non
<b>allZonesReport.txt</b>	Résumé par année des contraintes clés et des taux de récolte
<b>areaByConstraint.txt</b>	Par UA, la superficie (ha) dans différentes classes de disponibilité des volumes (disponible, récupérable, trop jeune)
<b>availVolByConstraint.txt</b>	Détails sur les volumes de bois vivant
<b>BernierClasses.txt</b>	Superficies par classe de composition et d'âge, selon Bernier et coll. 2016
<b>BernierParam.txt</b>	Paramètres de Bernier appliqués dans la modélisation
<b>BurnRecord.txt</b>	Superficies brûlées
<b>CaribouRecord.txt</b>	Superficies de l'habitat du caribou
<b>EpcRecord.txt</b>	Superficies en EPC
<b>FireSizeRecord.txt</b>	Distribution des classes de taille de feux
<b>HarvestRecord.txt</b>	Superficies et volumes récoltés, par type de volumes
<b>IntensiveRecord.txt</b>	Superficies plantées en zone d'aménagement intensif
<b>KeyOutput.txt</b>	Résumé des indicateurs clés
<b>LinearRecord.txt</b>	Superficies occupées par les chemins
<b>LostVolBurn.txt</b>	Volumes perdus aux feux
<b>LostVolDecay.txt</b>	Volumes perdus à la décomposition après feu
<b>ManagementIntensity.txt</b>	Indicateurs de l'intensité d'aménagement (ha par classe d'intensité)
<b>PlantedStrataRecord.txt</b>	Superficies plantées par type de plantation
<b>PlantRecord.txt</b>	Superficies plantées
<b>RegenRecord.txt</b>	Échecs de régénération
<b>RoadsRecord.txt</b>	Superficies occupées par les chemins, par classes de chemin
<b>SalvageRecord.txt</b>	Superficies et volumes récupérés après feu
<b>strataArea.txt</b>	Superficies occupées par strate d'aménagement
<b>strataVol.txt</b>	Volumes par strates d'aménagement
<b>tbeMortalite.txt</b>	Superficies de mortalité sévère due à la TBE
<b>volModAreaWeight.txt</b>	Résumé des modificateurs de volumes marchands en fonction des CC
<b>volumeByConstraint.txt</b>	Volumes marchands par classe de contrainte
<b>zonesAUReport.txt</b>	Indicateurs par UTA
<b>zonesReport.txt</b>	Indicateurs par type de zonage





