Agence Forestière des Bois-Francs

Guide sylvicole

d'adaptation aux changements climatiques des forêts privées du Centre-du-Québec

Phase 1 Contexte, analyse de vulnérabilité, de résilience, de déclin prématuré des paysages et plan d'action

LISTE DES COLLABORATEURS

Coordination du projet et rédaction intégrale	Carine Annecou, ing.f.	AFBF
Collaboration à la rédaction		
Introduction	Alexandre Guay-Picard, ing.f., M. Sc.	SSAD
Vocabulaire essentiel	Bruno Boulet, M. Sc.	Consultant forestier
Plan d'action	Steve Lemay, tech. for.	AFBF
	Guy Larochelle, ing.f., Directeur	AFBF
	Alexandre Guay-Picard, ing.f., M. Sc.	SSAD
Géomatique et cartographie		
Conception intégrale	Carine Annecou, ing.f.	AFBF
Réalisation intégrale	Rosemarie Léger, stag. géomatique	UdeS
Support technique	Jean-François Pépin, tech. for.	AFM
Support scientifique	Jean-Daniel Sylvain, géo., M. Sc.	DRF
	Laura Boisvert-Marsh, biol. Ph. D.	SCF
Révision technique intégrale	Steve Lemay, tech. for.	AFBF
	Guy Larochelle, ing.f., Directeur	AFBF
	Alexandre Guay-Picard, ing.f., M. Sc.	SSAD
Révision linguistique intégrale	Nathalie Dion,	Consultante linguistique
	Michel Huot, M. Sc.	Consultant forestier
	Marc-André Descôteaux	AFSQ
	Mélanie Bergeron, biol., M. Sc.	AFSQ
Révision scientifique		
Méthodologie, résultats et discussion	Laura Boisvert-Marsh, biol., M. Sc.	SCF
	Jean-Daniel Sylvain, Géo., M. Sc.	DRF
Mise en page	Carine Annecou, ing.f.	AFBF
Photographie de couverture	Steve Lemay, tech. for.	AFBF
Couverture	Mélanie Bergeron, biol, M. Sc.	AFSQ

REMERCIEMENTS

La production du document de la phase 1 du guide sylvicole s'est appuyée sur les réflexions menées dans le cadre d'un groupe de travail ayant réuni les collaborateurs suivants :

Alexandre Guay-Picard (SSAD), Patrick Lupien (SPBM), Steve Breton (AFM), Jean-François Pépin, (AFM), Steve Lemay (AFBF), Rosemarie Léger (Université de Sherbrooke), Guy Larochelle, avec le soutien scientifique de Jean-Daniel Sylvain (DRF), Laura Boisvert-Marsh (SCF), Isabelle Aubin (SCF), Anne Blondlot (Ouranos), Michel Huot (Consultant forestier) et Bruno Boulet (Consultant forestier).

L'Agence forestière des Bois-Francs remercie tous les participants et participantes de ce projet. Votre implication démontre à quel point travailler ensemble aide à cerner la problématique, transférer la connaissance et trouver des solutions. Ce fut un privilège d'avoir la contribution d'intervenants du domaine géographique, forestier, biologique, climatique et scientifique.

De plus, ce guide a été rendu possible grâce à la contribution du Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD) et de son partenaire financier le gouvernement du Québec.

Référence suggérée :

Annecou C., A. Guay-Picard, R. Léger, S. Lemay, G. Larochelle, 2021. Guide sylvicole d'adaptation aux changements climatiques des forêts privées du Centre-du-Québec - Phase 1 : Contexte, analyse de vulnérabilité, de résilience, de déclin prématuré des paysages et plan d'action. Agence forestière des Bois-Francs, Victoriaville. 50 p.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux i

Liste des figures i

Liste des cartes iii

1. Introduction 1

1.1 Brève description du territoire forestier du Centre-du-Québec 2

1.1.1 Les Basses-Terres du Saint-Laurent 4

1.1.2 Les Appalaches septentrionales 5

2. Revue de littérature sur les changements climatiques à prévoir 9

2.1 Les différents scénarios climatiques 9

2.2 Enjeux climatiques à l'échelle provinciale 10

2.3 Enjeux climatiques à l'échelle régionale 12

2.3.1 Température annuelle moyenne 12

2.3.2 Chaleur extrême de plus de 30°C 13

2.3.3 Précipitations annuelles moyennes et saisonnières 13

2.3.4 Indice d'humidité climatique 15

2.3.5 Planification des activités forestières 16

3. Les effets potentiels des changements climatiques sur les peuplements forestiers au Centre-du-Québec 17

3.1 Relation entre les éléments fondamentaux du système naturel 17

3.1.1 Vocabulaire essentiel 18

3.2 Aire de répartition des essences forestières 19

3.3 Sensibilité des essences face aux sécheresses 19

4. Analyse des peuplements forestiers menacés par les sécheresses du Centre-du-Québec 21

4.1 Contexte 21

4.2 Approche préconisée 21

4.2.1 Objectifs visés 21
4.2.2 Synthèse des étapes de réalisation 22
4.3.1 Étape 1 – Bilan des connaissances et des indicateurs disponibles 23
4.3.2 Étape 2 – Mise en place d'un outil géomatique 23
4.3.3 Étape 3 – Mesures d'adaptations sylvicoles 24
5. Méthodologie générale des analyses 25
5.1 Introduction 25
5.2 Indices, sous-indices et variables 25
5.2.1 Les indices 25
5.2.2 Les sous-indices 25
5.2.3 Détermination des classes 27
6. Résultats des sous-indices et des indices géomatiques et discussion 30
6.1 Les cartes des sous-indices 30
6.1.1 L'exposition du terrain 30
6.1.2 La sensibilité des espèces aux sécheresses 31
6.1.3 L'adaptation du paysage aux sécheresses 32
6.1.4 L'évolution de l'indice d'humidité climatique 33
6.2 Les cartes des indices 34
6.2.1 La vulnérabilité des peuplements aux sécheresses 34
6.2.2 La résilience des paysages aux sécheresses 38
6.2.3 Le risque de déclin prématuré des paysages forestiers 40
7. Discussion et conclusion des analyses 42
8 Plan d'action en matière d'adaptation aux changements climatiques de l'Agence forestière des Bois-Francs 43
8.1 Axe 1 – Favoriser le transfert de connaissances et des compétences sur les changements climatiques par la communication et la formation proactive 45

8.2 Axe 2 – Diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers par une augmentation de la diversité 46
8.3 Axe 3 – Favoriser l'aménagement intensif des sites à haut rendement par l'analyse et la gestion des risques 48
9. Conclusion générale 49
Bibliographie 50

LISTE DES TABLEAUX

***Tableau 1** : Superficies (ha) des principaux peuplements forestiers des BTSL par régime hydrique du Centre-du-Québec (PPMV 2014)* _____ *6*

***Tableau 2** : Superficie (ha) des principaux peuplements forestiers des Appalaches par régime hydrique du Centre-du-Québec (PPMV 2014)*_____ *6*

***Tableau 3** : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour favoriser le transfert de connaissances entre les intervenants du milieu naturel du Centre-du-Québec*_____ *45*

***Tableau 4** : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers du Centre-du-Québec.*_____ *46*

***Tableau 5** : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour augmenter le rendement des peuplements forestiers les plus productifs et les moins à risque face aux sécheresses futures au Centre-du-Québec.*__ *48*

LISTE DES FIGURES

***Figure 1** : Paysage des plaines du St-Laurent au Centre-du-Québec* _____ *4*

***Figure 2** : Paysage des Appalaches au Centre-du-Québec* _____ *5*

***Figure 3** : Schéma synthèse montrant les quatre principaux scénarios de prédiction d'émission de CO_2 et les effets engendrés sur l'élévation de la température annuelle moyenne de la planète. Adapté de Neil Craik, Université de Waterloo* _____ *9*

***Figure 4** : Comparaison de la température annuelle moyenne du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action (en rouge) avant la fin du siècle (tiré du site web d'Ouranos)*_____ *12*

***Figure 5** : Comparaison du nombre de jours annuel moyen cumulatifs de la température > 30°C du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action (en rouge) (tiré du site web d'Ouranos)*_____ *13*

***Figure 6** : Comparaison des précipitations annuelles moyennes totales du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action avant le fin du siècle (en rouge) (tiré du site web d'Ouranos)* _____ *14*

Figure 7 *: Comparaison des précipitations estivales moyennes du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action (en rouge) avant la fin du siècle (tiré du site web d'Ouranos)* _____ *14*

Figure 8 *: a- Différence de l'indice d'humidité climatique annuel entre l'horizon 1971-2000 et 2041-2070 du RCP 8,5 provenant des projections du Gouvernement du Canada pour la région du Centre-du-Québec; b- Histogramme de la fréquence du delta IHC de la figure 8a. c- Comparaison du déficit hydrique de la saison de croissance (précipitation – évapotranspiration) entre le scénario climatique RCP 4,5 (en bleu) et le scénario RCP 8,5 (en rouge) provenant des projections d'Ouranos (Figure adaptée de Logan 2017)* _____ *15*

Figure 9 *: Comparaison du nombre de jours du début de la saison sans gel (printemps) et de sa fin (automne) prévu pour la période de 2041-2070 entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions concrètes visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action avant la fin du siècle (en rouge). Adaptation visuelle des informations connues sur la fin et le début de la saison sans gel de Logan 2017* _____ *16*

Figure 10 *: Diagramme de Venn montrant les ensembles entre les éléments fondamentaux d'un système naturel* ___ *17*

Figure 11 *: Schéma synthèse des quatre sous-indices pour la création des indices d'analyse de la vulnérabilité, de la résilience et du risque de déclin prématuré des peuplements forestiers à la sécheresse du Centre-du-Québec. Les couleurs sont en harmonie avec la figure 10* _____ *23*

Figure 12 *: Schéma structurel et associatif des indices, sous-indices et des bases de données qui ont permis l'analyse des peuplements du Centre-du-Québec* _____ *28*

Figure 13 *: Proportion relative des classes de la vulnérabilité à la sécheresse par types de couvert forestier du Centre-du-Québec* _____ *34*

Figure 14 *: Proportion relative des classes de la vulnérabilité à la sécheresse des peuplements forestiers de chacune des MRC du Centre-du-Québec* _____ *35*

Figure 15 *: Proportion relative des classes de résilience à la sécheresse des paysages forestiers de chacune des MRC du Centre-du-Québec* _____ *38*

Figure 16 *: Proportion relative des classes du risque de déclin prématuré du paysage forestier à la sécheresse de chacune des MRC du Centre-du-Québec*_____ *40*

Figure 17 *: Formation sur les milieux humides*_____ *45*

Figure 18 *: Détection de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur le terrain* _____ *46*

Figure 19 *: Plantation de résineux par bandes*_____ *48*

LISTE DES CARTES

***Carte 1** : Les provinces naturelles du territoire de l'Agence des Bois-Francs (PPMV 2014) 3*

***Carte 2** : Caractéristiques texturales des sols du Centre-du-Québec provenant de données matricielles entre 30 et 60 cm de profondeur (Sylvain et al. 2020) 7*

***Carte 3** : Types de couvert forestier de la région du Centre-du-Québec (PPMV 2014). 8*

***Carte 4** : Exposition du terrain selon les caractéristiques physiques des peuplements forestiers du Centre-du-Québec... 30*

***Carte 5** : Sensibilité physiologique à la sécheresse par espèces des peuplements forestiers du Centre-du-Québec..... 31*

***Carte 6** : Adaptation des peuplements aux sécheresses regroupés par district écologique (paysage local) du Centre-du-Québec 32*

***Carte 7** : Évolution du climat en fonction de la différence entre les valeurs de l'humidité climatique historiques (1971-2000) et futures (2041-2070) du scénario climatique RCP 8,5 ..... 33*

***Carte 8** : Vulnérabilité des peuplements forestiers aux sécheresses du Centre-du-Québec prévues d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario climatique RCP 8,5 du Centre-du-Québec 37*

***Carte 9** : Résilience du paysage à la sécheresse d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario climatique RCP 8,5 du Centre-du-Québec 39*

***Carte 10** : Risque de déclin prématuré des paysages forestiers d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario RCP 8,5 ..... 41*

1. INTRODUCTION

Dans son rôle d'orientation des investissements sylvicoles, l'Agence forestière des Bois-Francs a comme mandat de favoriser un aménagement qui permet la convergence des **fonctions économiques, écologiques et sociales des forêts**. L'Agence estime que l'intégration de différentes approches forestières est nécessaire pour assurer un développement forestier durable et résilient dans un contexte de changements climatiques (CC). Le présent guide sylvicole est divisé en deux tomes et a été rédigé en complément au PPMV de l'Agence forestière des Bois-Francs de 2014. Cet ouvrage de référence, basé sur des problématiques et des besoins régionaux, vise à offrir aux conseillers forestiers une palette d'options sylvicoles dans l'application de l'adaptation des activités d'aménagement forestier face aux perturbations envisagées par les changements climatiques. Le contexte d'aménagement régional est, dans un premier temps, exposé brièvement et fait référence aux deux grands ensembles physiographiques du Centre-du-Québec soit les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches. Dans un deuxième temps, une revue de littérature expose les avancées de la recherche au sujet des changements climatiques. Celle-ci est accompagnée d'une analyse de la vulnérabilité des peuplements forestiers aux sécheresses futures, un outil essentiel à la planification forestière. Deux autres outils ont été créés pour compléter l'analyse soit la résilience du paysage et le risque de déclin prématuré des peuplements. L'orientation générale de l'Agence en matière d'adaptation aux changements climatiques est exposée suivie par la présentation de trois axes prioritaires d'actions. Les objectifs spécifiques visés et les bénéfices envisagés sont aussi présentés. Pour achever ce travail de fond, une phase 2 du guide sylvicole est en cours de création et exposera les scénarios sylvicoles d'adaptation aux changements climatiques pour chacune des principales entités forestières de la région. Ces scénarios auront été confectionnés en collaboration avec les conseillers forestiers de notre région.

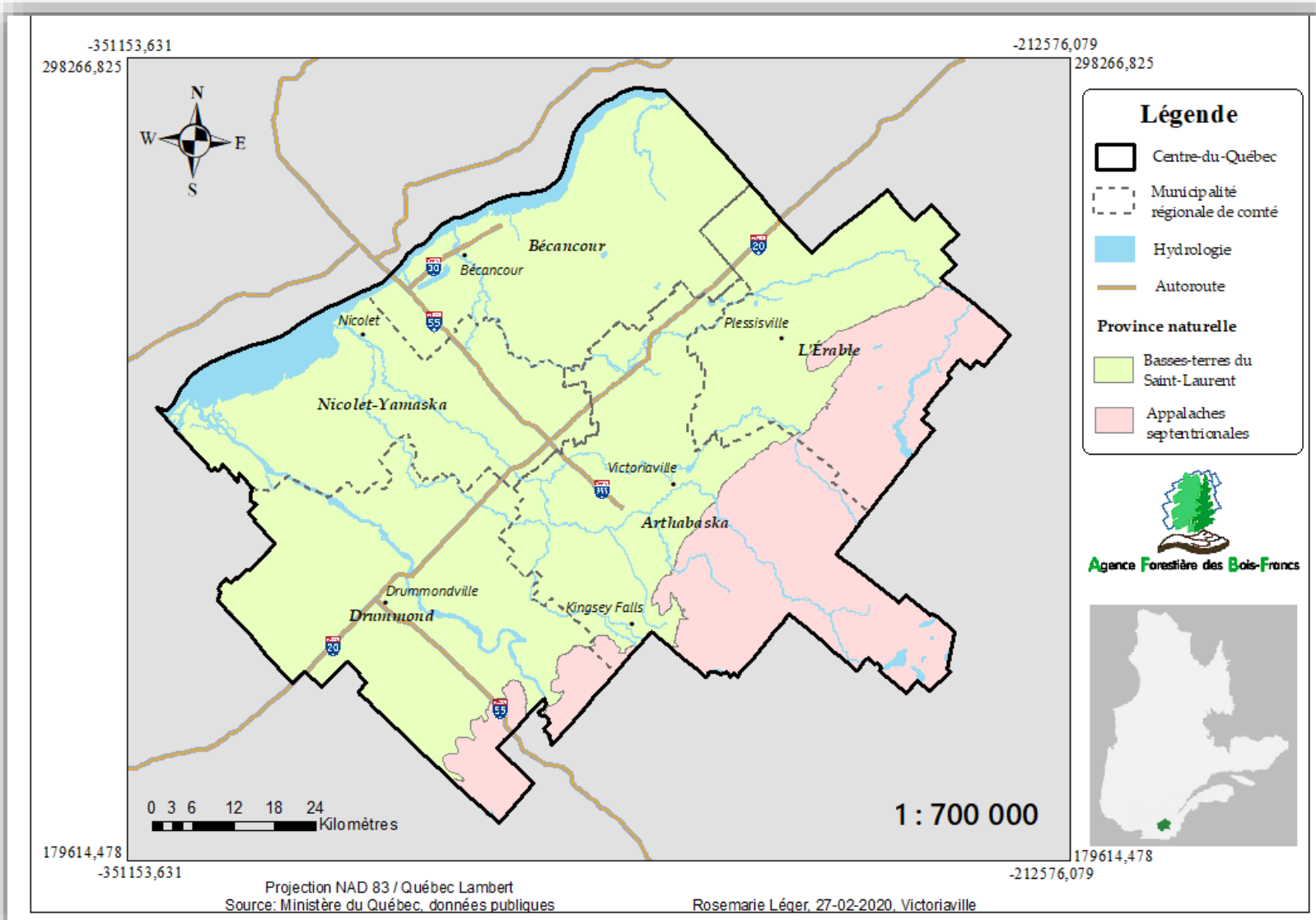
> Les agences forestières ont pour principal mandat d'orienter et de développer la mise en valeur des forêts privées de leur territoire. Pour ce faire, elles doivent élaborer un plan de protection et de mise en valeur (ppmv) des forêts de leur territoire et en assurer le soutien technique et financier.

1.1 BRÈVE DESCRIPTION DU TERRITOIRE FORESTIER DU CENTRE-DU-QUÉBEC

Il est nécessaire de considérer les particularités territoriales du Centre-du-Québec avant de préciser une stratégie d'aménagement dans un contexte de changements climatiques. Le lecteur trouvera une description complète et détaillée sous plusieurs angles dans la dernière version du *Plan de protection et de mise en valeur des forêts privées du Centre-du-Québec* 2014.

La région du Centre-du-Québec est délimitée par le fleuve au nord, l'Estrie au sud, la Montérégie à l'ouest et la région Chaudière-Appalaches à l'est. Le territoire compte cinq MRC et huit conseillers forestiers accrédités par l'Agence pour assurer les services d'aménagement forestier auprès des propriétaires de boisés à l'intérieur du programme de mise en valeur des forêts privées du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Le territoire du Centre-du-Québec chevauche deux grandes provinces naturelles soit les Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL) et les Appalaches septentrionales (carte 1) (Beauchesne et al. 1998). De ce fait, on remarque d'importantes différences au sujet des conditions écologiques que l'on rencontre dans chacune de ces provinces naturelles, car le relief, le climat et les sols ont un effet majeur sur le type de végétation que l'on y retrouve. Néanmoins, plusieurs réalités d'économie régionale ont également joué et joueront un rôle important dans la composition des forêts actuelles et futures. En ce moment, les groupements d'espèces les plus représentés de la région du Centre-du-Québec sont sans surprise les érablières rouges avec feuillus intolérants, soit le peuplier faux-tremble et le bouleau gris, qui dominent nos forêts centricoises avec près de 30 000 ha réunis. Toutefois, les érablières avec feuillus tolérants suivent de près avec approximativement 26 000 ha. Le mélange de l'érable rouge avec le bouleau jaune et le sapin baumier arrive en troisième position avec près de 11 000 ha. D'abord, il y a les Basses-Terres du Saint-Laurent, dont l'origine géologique et la topographie confèrent à la superficie productive des forêts un caractère plutôt plat avec une composition d'essences adaptées à un drainage subhydrique comme l'érable rouge, le bouleau jaune, le sapin baumier, mais aussi adaptées aux perturbations anthropiques comme le peuplier. De plus, il y a une proportion plus rare d'essences forestières adaptées au drainage des milieux humides comme le frêne noir, le thuya occidental et le mélèze larcin. Les plantations de résineux font aussi partie du paysage. Ensuite, il y a les coteaux et vallons des Appalaches où les conditions de drainage sont meilleures, assurant la productivité des forêts d'espèces de milieux mésiques comme l'érable à sucre, le hêtre à grandes feuilles ou le bouleau jaune. Dans l'ensemble, le territoire possède près de 58 % de forêt dont 35 % de celle-ci se retrouve en milieux humides surtout boisés (données vectorielles du MELCC 2020).

Carte 1 : Les provinces naturelles du territoire de l'Agence des Bois-Francs (PPMV 2014).



1.1.1 LES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT

Figure 1 : Paysage des plaines du St-Laurent au Centre-du-Québec.

Les loams sableux et les drainages imparfaits dominent l'ensemble physiographique des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL). Près de 66 % de la superficie est composée de dépôts de loams sableux et plus de 20 % de dépôts sableux (carte 2), tandis que plus de la moitié de cette province naturelle des BTSL se situe en zone où le drainage est subhydrique (tableau 1-PPMV 2014). Aujourd'hui, 42 % de la superficie forestière de cet ensemble physiographique est dominée par l'érable rouge (PPMV 2014). La prépondérance de cette espèce constitue un enjeu sylvicole important pour la région. D'autres écosystèmes distincts aux BTSL sont présents en quantité suffisante pour y établir des stratégies sylvicoles particulières. Notamment les pessières et mélézaies, typiques des milieux humides, sont fréquentes dans la plaine et les interventions forestières avec un prélèvement élevé n'y sont pas recommandées. Les terres argileuses inondables, surtout concentrées dans la MRC de Nicolet-Yamaska, sont souvent composées de feuillus de milieux humides ou de milieux riverains (érable argenté, orme d'Amérique, frênes rouge et noir, etc.). Les pinèdes et prucheraies sont également des écosystèmes distincts de la plaine du Saint-Laurent. Caractéristiques des dépôts sableux, ces espèces, qui furent surexploitées à l'époque coloniale, sont en voie de raréfaction dans l'ensemble de la province (Doyon et Bouffard 2009). Finalement, les peuplements forestiers de feuillus intolérants, dont les peupleraies, sont une autre composante prépondérante des BTSL et de ses nombreuses perturbations anthropiques (carte 3). En effet, l'exploitation forestière des années 1940 et 1960 a laissé derrière elle une composition forestière dominée par les feuillus intolérants avec une structure équienne, c'est-à-dire avec des arbres qui ont sensiblement le même âge et la même hauteur. Aujourd'hui, il est important de mettre des efforts supplémentaires dans l'augmentation de la diversité de la composition et de la structure forestière.

1.1.2 LES APPALACHES SEPTENTRIONALES

Figure 2 : Paysage des Appalaches au Centre-du-Québec.

La dynamique forestière appalachienne est différente de celle de la plaine. Les dépôts glaciaires constitués de loams sableux dominent le territoire sous tous les peuplements forestiers (carte 2). Les drainages bons à modérés sont la norme, constituant ainsi une zone forestière très productive (tableau 2-PPMV 2014). Près de 90 % des dépôts centricois des Appalaches sont des tills, alors que près de 75 % de la zone possède un régime hydrique mésique (PPMV 2014). Les conditions de croissance qui prévalent dans les Appalaches centricoises ont favorisé l'établissement de l'érable à sucre qui domine près de 30 % des superficies forestières suivies de près par l'érable rouge (PPMV 2014). De ce fait, l'industrie acéricole est florissante dans le sud des MRC d'Arthabaska et de l'Érable ce qui tend à valoriser davantage la prédominance de l'érable à sucre. On retrouve également deux types de peuplements résineux naturels très communs dans le secteur appalachien du Centre-du-Québec, soit les sapinières et les pessières.

Tableau 1 : Superficies (ha) des principaux peuplements forestiers des BTSL par régime hydrique du Centre-du-Québec (PPMV 2014).

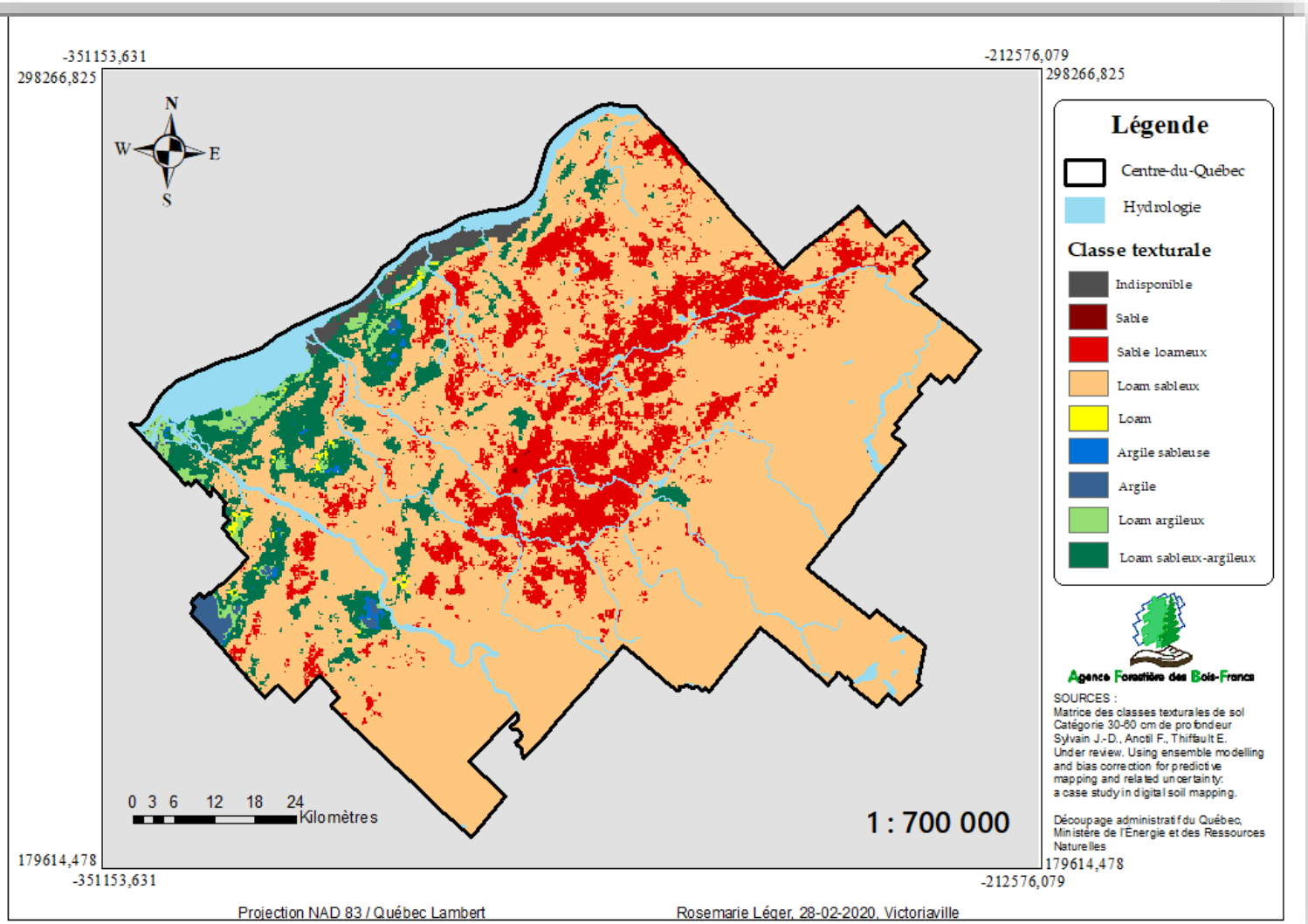
Régime hydrique	Érablière rouge	Sapinière	Plantation de résineux	Pessière et Mélézaie	Pinède et Prucheraie	Érablière à sucre	Peupleraie et feuillus intolérants	Autres	Total (ha)	% BTSL
Xérique	219	12	2	0	159	226	50	475	1 143	0,5
Mésique	29 268	1 108	4 510	178	4 598	11 168	2 592	3 229	56 651	24,1
Sub-hydrique	72 173	17 194	16 352	2 359	8 037	1 031	7 340	9 477	133 962	57,0
Hydrique	10 605	7 094	2 982	10 740	334	7	2 184	9 295	43 241	18,4
Total (ha)	112 264	25 407	23 846	13 278	13 129	12 431	12 167	22 476	234 997	100,0
% BTSL	47,8	10,8	10,1	5,6	5,6	5,3	5,2	9,6	100,0	

Tableau 2 : Superficies (ha) des principaux peuplements forestiers des Appalaches par régime hydrique du Centre-du-Québec (PPMV 2014).

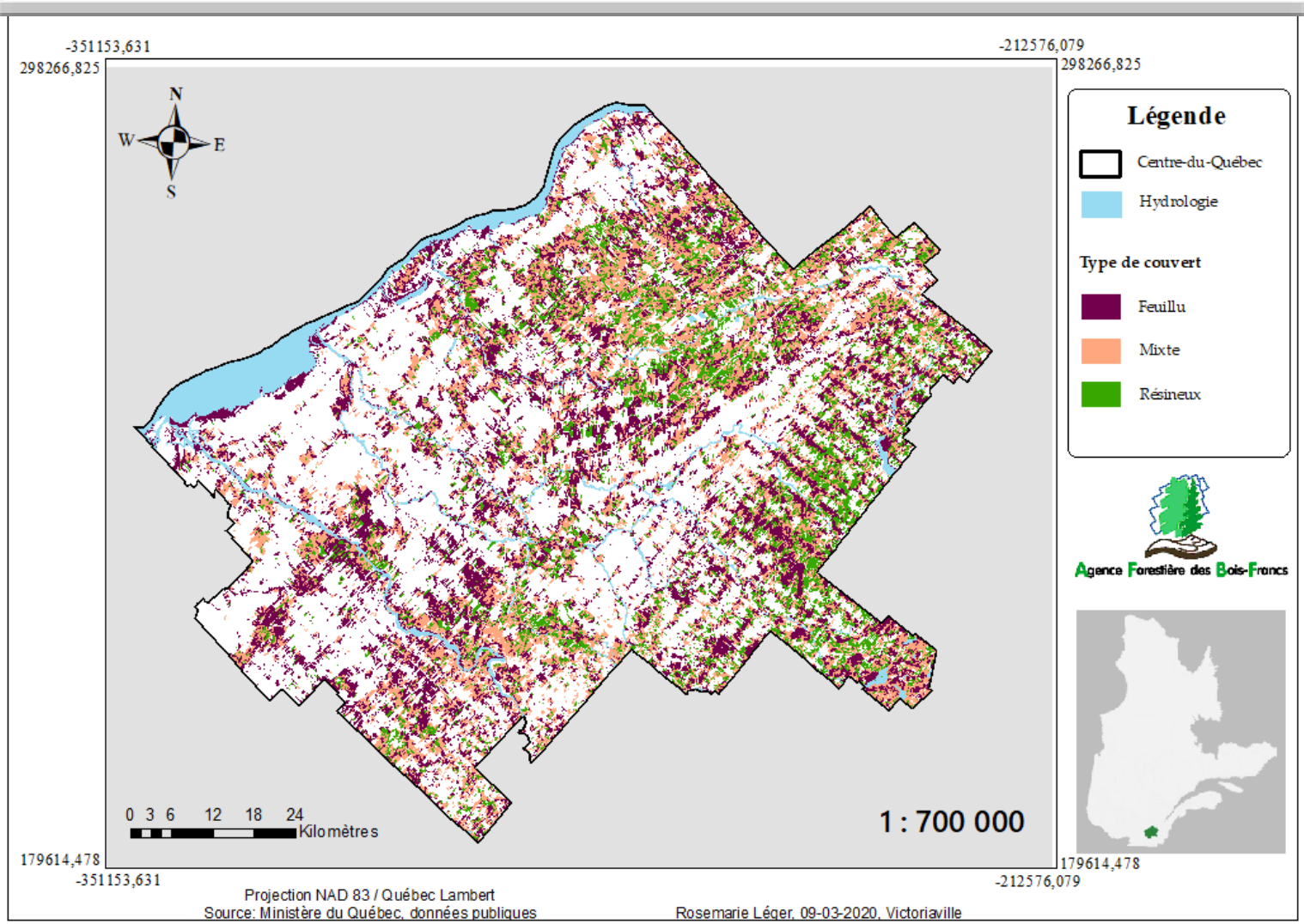
Régime hydrique	Érablière à sucre	Érablière rouge	Sapinière	Plantation de résineux	Pessière	Autres	Total (ha)	% Appalaches
Xérique	38	58	22	6	3	87	213	0,2
Mésique	24 558	14 216	6 614	8 213	6 552	4 278	64 432	72,2
Subhydrique	485	7 105	6 326	2 386	2 746	3 216	22 264	24,9
Hydrique	0	263	614	159	91	1 051	2 179	2,4
Total (ha)	25 081	21 642	13 577	10 765	9 392	8 631	89 088	99,8
% Appalaches	28,1	24,2	15,2	12,1	10,5	9,7	99,8	

*À noter : les superficies sur roc n'ont pas été incluses, ainsi, la proportion considéré n'est pas de 100%.

Carte 2 : Caractéristiques texturales des sols du Centre-du-Québec provenant de données matricielles entre 30 et 60 cm de profondeur (Sylvain et al. 2020).



Carte 3 : Types de couvert forestier de la région du Centre-du-Québec (PPMV 2014).



2. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PRÉVOIR

2.1 LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Les scientifiques experts en matière de changements climatiques ont défini différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Les scénarios sont construits à partir de la réunion de plusieurs éléments d'hypothèses sur : les activités humaines actuelles et futures, la croissance de la population, le développement des technologies, les décisions politiques au sujet de l'utilisation des sources d'énergie, et l'occupation des terres. Les scénarios se distinguent par leurs conséquences sur la température planétaire future (figure 3, axe vertical de droite) et évoluent dans le temps (axe horizontal).

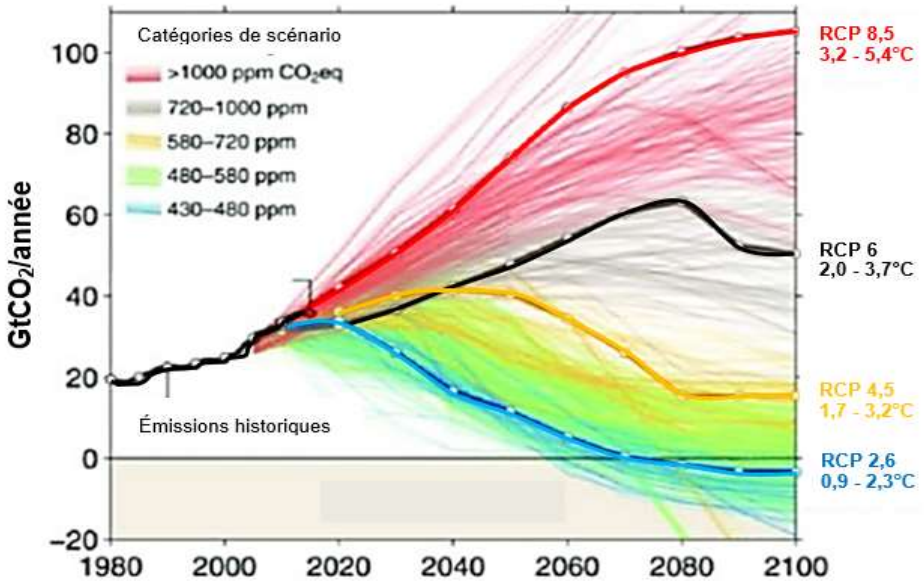


Figure 3 : Schéma synthèse montrant les quatre principaux scénarios de prédiction d'émission de CO_2 et les effets engendrés sur l'élévation de la température annuelle moyenne de la planète.
Adapté de Neil Craik, Université de Waterloo.

Le scénario représenté par la courbe de couleur rouge (RCP 8,5) est celui qui propose un effet de l'augmentation du CO_2 très élevé sur la température planétaire (jusqu'à 5,4 °C). Le scénario RCP 8,5 est basé sur l'hypothèse que la consommation d'énergie fossile grandira encore pour un moment en fonction de la croissance de la population et qu'une utilisation accrue des terres pour l'agriculture et le pâturage intensif sera nécessaire aux dépens d'une diminution de la superficie globale des forêts (Riahi K. et al. 2011).

À l'opposé, celui représenté par la courbe de couleur jaune (RCP 4,5) propose une diminution drastique de la température vers l'année 2050. Le scénario RCP 4,5 considère dans ses calculs l'hypothèse que des actions politiques, technologiques, démographique et écologique pour atténuer les gaz à effet de serre seraient prises immédiatement. Il y a néanmoins un niveau d'incertitude pour

chacun des scénarios, caractérisé sur la figure par les lignes plus pâles. Il existe aussi d'autres schémas synthèses proposant d'autres scénarios envisageables. Ce qui est important de retenir est qu'il existe plusieurs scénarios possibles pour estimer les effets potentiels des changements climatiques. Ainsi, il est essentiel que l'information soit claire lors de la présentation des résultats. À ce sujet, dans ce guide, nous discutons des résultats provenant de deux scénarios différents :

1. Le scénario RCP 4,5 et RCP 8,5 de l'horizon 2041-2070 sont comparés au sujet des projections climatiques proposé par Ouranos sur la température annuelle moyenne, les précipitations annuelles moyennes et saisonnières, les chaleurs extrêmes de plus de 30 °C et le déficit hydrique atmosphérique ;
2. Le scénario RCP 8,5 de l'horizon 2041-2070 a été retenu par l'Agence forestière des Bois-Francs pour le calcul de l'indice d'humidité climatique (IHC) du Gouvernement du Canada afin de produire les outils géomatiques de l'analyse de vulnérabilité, de la résilience et du risque de déclin prématuré des peuplements forestiers de la région.

Aujourd'hui, un mouvement scientifique émergeant signale que le scénario le plus probant se situe entre le RCP 6 et le RCP 8,5. Bien entendu, cette courbe pourrait s'incliner vers le bas si des mesures de mitigation étaient mises en place comme des politiques obligeant le développement des technologies utilisant l'énergie renouvelable en remplacement à l'énergie fossile. Toutefois, les pays n'ayant pas ces technologies continueraient leurs activités courantes et ainsi la progression de la courbe vers le bas serait envisagée plus lente que prévu à l'origine (Riahi K. et al. 2011). À cet effet, nous croyons qu'il est plus efficace de se préparer au pire scénario dans un avenir incertain. Au meilleur des cas, il y aura moins d'effort d'adaptation à faire en 2050 si les émissions de gaz à effet de serre ont diminué d'ici là.

2.2 ENJEUX CLIMATIQUES À L'ÉCHELLE PROVINCIALE

À l'échelle provinciale, les scénarios climatiques projettent, entre autres, un réchauffement de la température, un allongement de la saison de croissance, une augmentation de la probabilité d'occurrence des extrêmes climatiques, des saisons de couverture de neige et de glace plus courtes, etc. (Ouranos 2015, CCCR 2019). Le Nord du Canada, soit le Nunavut s'est réchauffé et se réchauffe à plus du double du taux mondial (CCCR 2019).

Les hausses de température pourront avoir une influence sur plusieurs processus biologiques. Par exemple, la phénologie des espèces forestières, le métabolisme, la croissance ainsi que le débourrement et la floraison pourraient être désynchronisés par l'augmentation de la température (Lupi et al. 2010; Huang et al. 2010). L'influence de la température sur les espèces forestières est également majeure dans les mécanismes de compétitions, de distribution et de migration (Brice et al. 2019, Aubin et al. 2018, Boivert-Marsh et al. 2014). Avec les hausses de température, on pourrait s'attendre à ce que l'enveloppe climatique de plusieurs espèces s'étende plus au nord et que la limite au sud devienne moins favorable pour certaines espèces (Périé et al. 2014).

Les précipitations moyennes en hiver pourront augmenter de façon plus importante dans la portion nord du territoire tandis que les précipitations estivales pourront augmenter très légèrement ou ne subiront pas de changements significatifs (Logan et al. 2011; DesJarlais et al. 2010). Toutefois, il semble que la précision des scénarios reste à valider, car certaines erreurs de mesure durant plusieurs années ont été découvertes récemment pour certaines stations météorologiques du Québec (CRF 2019), ce qui peut possiblement engendrer un biais dans les modèles. Néanmoins, la faible augmentation des précipitations jumelée à l'augmentation significative de la température estivale pourrait engendrer une diminution du contenu en eau des sols pendant la période de croissance de la végétation.

Selon une étude, **le contenu en eau des sols** pourrait diminuer dans certains sites de 20 à 40 % durant la saison de croissance de l'horizon de 2070-2099 comparativement à celle de 1971-2000 dans l'est du Canada (Houle et al. 2012) Les changements dans le régime des précipitations sous forme de **neige** sont également préoccupants. En effet, la neige agit comme un isolant au sol, permet de limiter le gel et préserve les racines de dommages importants (Henry et al. 2008). L'accumulation de neige au sol est nécessaire à la recharge de la réserve de l'eau utile du sol en période printanière. Un manque d'eau lors du début de la saison de croissance peut retarder ou diminuer la croissance de certaines espèces comme le chêne rouge (Stern 2020).

En plus de la diminution moyenne du contenu en eau des sols, **les épisodes de sécheresse intense,** c'est-à-dire ayant une température très élevée et une durée prolongée, sont appelées à augmenter dans le futur sur la plupart des continents (Allen et al. 2010, Breashers et al. 2009, Allen et al. 2015). À cet effet, il faut faire la différence entre les sécheresses récurrentes et les sécheresses exceptionnelles. Plusieurs espèces sont résilientes aux sécheresses récurrentes d'une intensité plus modérée. Cependant, même des espèces adaptées aux conditions extrêmes d'un site peuvent succomber à une sécheresse d'intensité élevée et de durée prolongée (Allen et al. 2010, Annecou et al. En préparation, Anderegg et al. 2013, Clark 2016, Adams et al. 2017). De plus, il est envisagé que l'augmentation du stress hydrique pourrait exacerber les dommages aux arbres causés par les insectes et les agents pathogènes dans l'est de l'Amérique du Nord et d'autant plus face aux espèces exotiques venues du sud (Dukes et al. 2009).

En conclusion, les conditions des stations forestières ainsi que la composition des peuplements forestiers peuvent influencer la réponse des forêts aux épisodes de sécheresse (Gewehr et al. 2014). Ces changements sur la végétation et le fonctionnement des écosystèmes forestiers méritent donc une attention particulière à une échelle régionale.

2.3 ENJEUX CLIMATIQUES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Plusieurs composantes du climat doivent être considérées pour évaluer les effets possibles des changements climatiques sur la planification forestière au Centre-du-Québec. Nous en avons retenu quelques-unes qui sont essentielles à la compréhension globale de la situation future du climat au Centre-du-Québec. Au début de cette section, nous procédons à une comparaison des projections des moyennes annuelles futures entre les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5 avec la donnée de référence de la région du Centre-du-Québec : la température, les précipitations totales liquides et solides, les journées chaudes au-dessus de 30 °C et le début et la fin de la saison sans gel. Nous discutons ensuite de l'effet de ses composantes sur la planification forestière. Notez qu'il est possible de consulter toutes les projections de mesures numériques de la température annuelle moyenne, de la chaleur extrême, des précipitations annuelles et saisonnières de cette section avec leurs intervalles d'incertitude sur le site web de l'organisme Ouranos. Par contre, pour des raisons pratiques, les mesures du déficit hydrique atmosphérique (section 2.3.4) ou dit autrement l'Indice d'humidité climatique (IHC) proviennent de la base de données du Gouvernement du Canada (McKenney et al. 2013). Cet indice climatique est un élément essentiel à la connaissance de la différence entre les projections annuelles des précipitations (addition d'eau) et celles de l'évapotranspiration (perte d'eau).

2.3.1 TEMPÉRATURE ANNUELLE MOYENNE

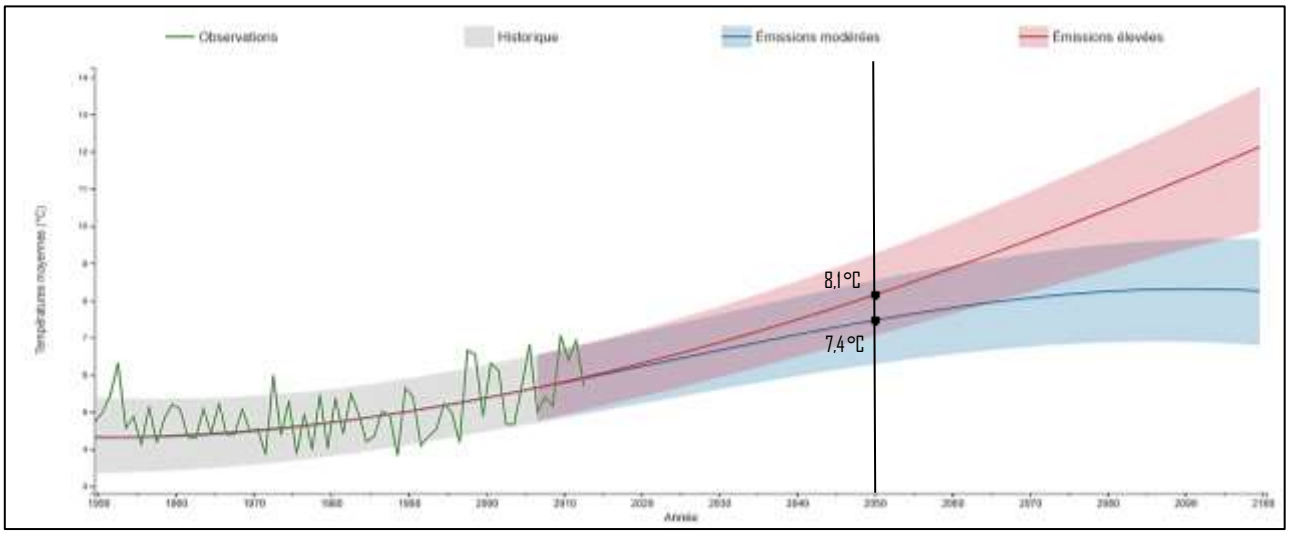


Figure 4 : Comparaison de la température annuelle moyenne du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action (en rouge) avant la fin du siècle (tiré du site web d'Ouranos).

Dans une perspective globale, la température serait à la hausse dans le futur pour le Centre-du-Québec (figure 4). Selon le scénario RCP 4,5 de l'horizon 2041-2070, la température annuelle moyenne de la région pourrait augmenter de 1,5 à 3,2 °C et atteindre en 2050 7,4° C. Tandis que dans le cas du scénario RCP 8,5 elle pourrait augmenter, pour le même horizon, de 2,6 à 3,9 °C soit atteindre 8,1° C en 2050.

2.3.2 CHALEUR EXTRÊME DE PLUS DE 30 °C

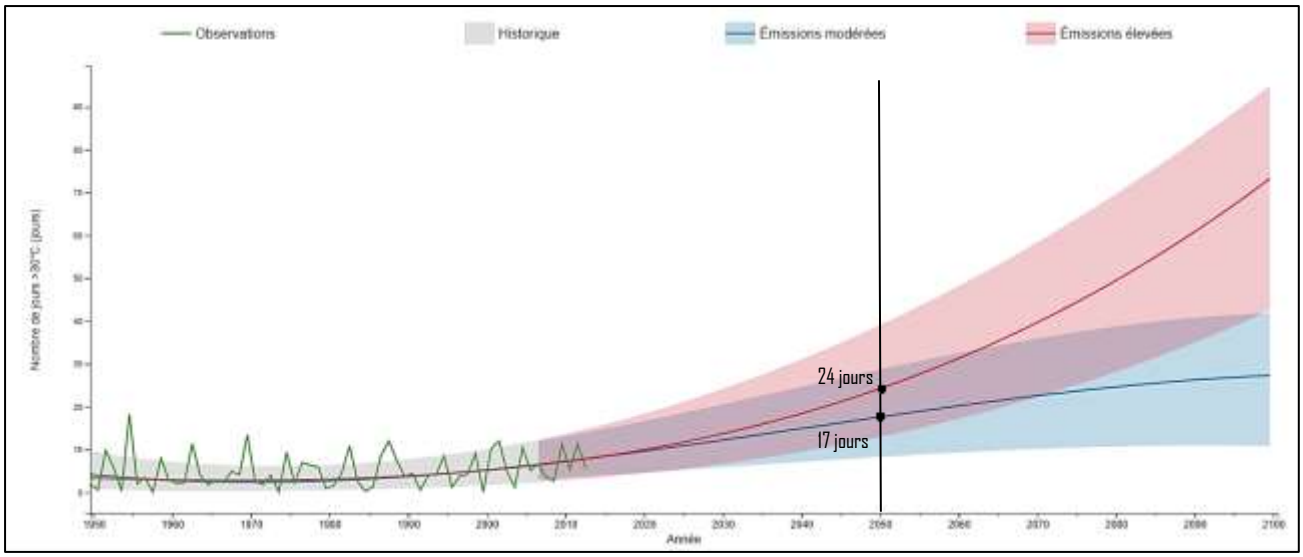


Figure 5 : Comparaison du nombre de jours annuel moyen cumulatifs de la température > 30 °C du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action avant la fin du siècle (en rouge) (tiré du site web d'Ouranos).

Dans une perspective globale, le nombre de jours de chaleurs extrêmes serait à la hausse dans le futur pour le Centre-du-Québec (figure 5). Selon le scénario RCP 4,5 de l'horizon 2041-2070, le nombre de jours de chaleurs extrêmes de la région pourrait augmenter de 8 à 21 et atteindre en 2050 17 jours. Tandis que dans le cas du scénario RCP 8,5 il pourrait augmenter, pour le même horizon, de 17 à 34, soit atteindre une moyenne de 24 jours en 2050.

2.3.3 PRÉCIPITATIONS ANNUELLES MOYENNES ET SAISONNIÈRES

Les précipitations annuelles moyennes totales (solide + liquide) pourraient être à la hausse dans le futur pour le Centre-du-Québec (figure 6). Selon le scénario RCP 4,5 de l'horizon 2041-2070, les précipitations annuelles moyennes totales de la région pourraient augmenter de 19 à 116 mm. Tandis que dans le cas du scénario RCP 8,5 elles pourraient augmenter, pour le même horizon, de 29 à 147 mm. L'enjeu des précipitations se situe dans le fait que les projections pour la période estivale pourraient rester à un niveau stable (figure 7) et que l'augmentation se retrouve dans les périodes automnales et hivernales sous forme liquide lorsque les arbres n'absorbent presque plus ou même pas du tout (hiver) cet eau.

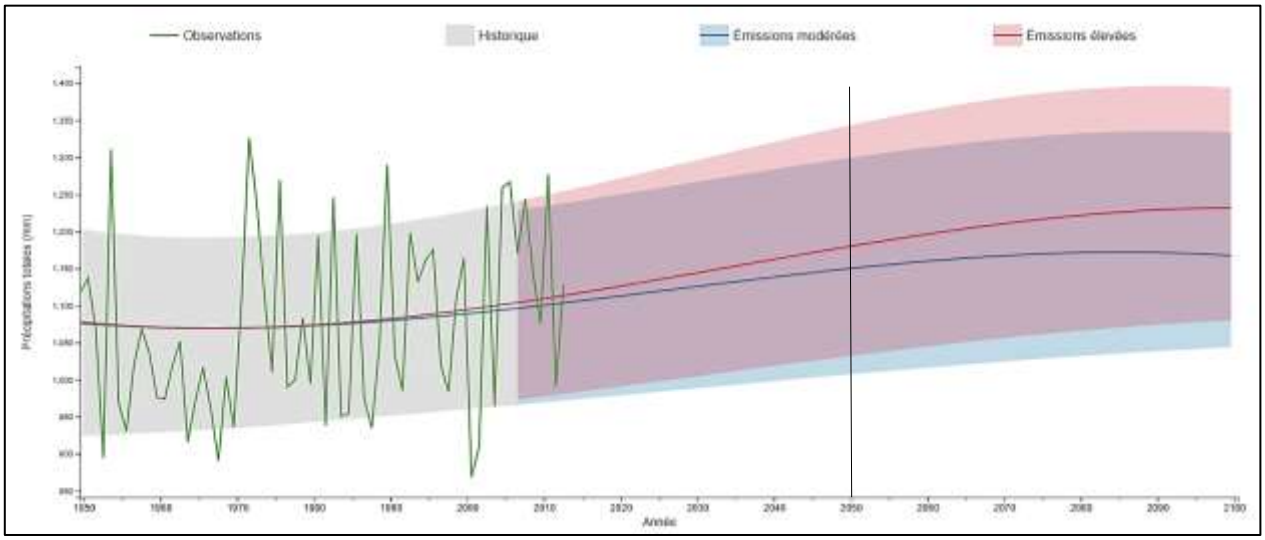


Figure 6 : Comparaison des précipitations annuelles moyennes totales du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action avant la fin du siècle (en rouge) (tiré du site web d'Ouranos).

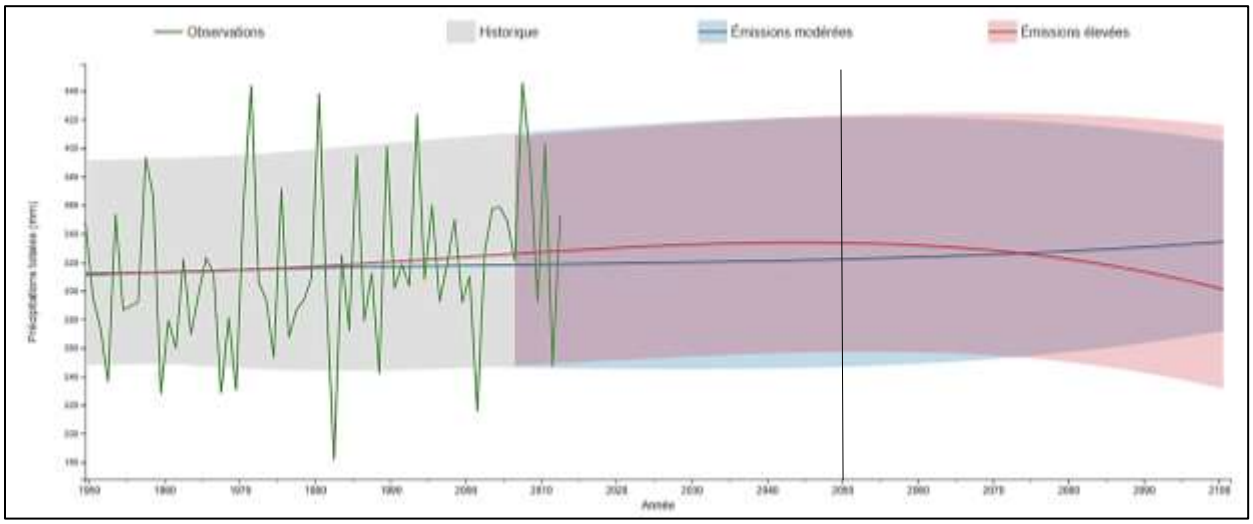
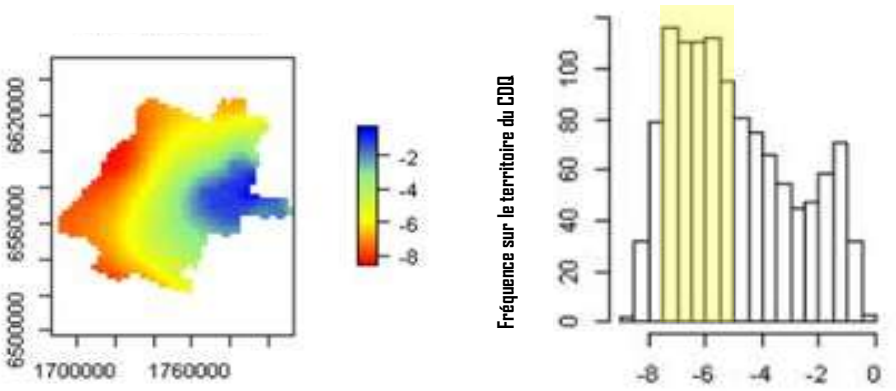


Figure 7 : Comparaison des précipitations estivales moyennes du Centre-du-Québec entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions immédiates visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action (en rouge) avant la fin du siècle (tiré du site web d'Ouranos).

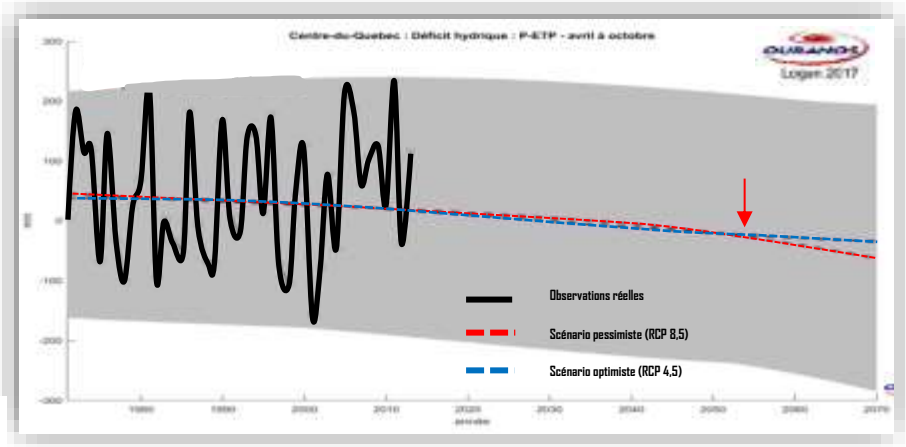
Avec une combinaison de l'augmentation de la température, des extrêmes de chaleur et d'une quantité stable de précipitation en été, il devient important de mieux connaître les projections de l'Indice d'humidité climatique. En effet, la connaissance du taux d'évapotranspiration des arbres nous aide à comprendre les effets potentiels des sécheresses sur la santé et la croissance des arbres lorsque leur demande en eau est importante (D'Orangeville et al. 2018).

2.3.4 INDICE D'HUMIDITÉ CLIMATIQUE

L'Indice d'humidité climatique (IHC) compare la quantité de précipitations (P) avec le taux d'évapotranspiration potentielle (ETP) de la végétation (P-ETP). Si la résultante est négative cela indique que les précipitations sont en quantité insuffisantes pour combler les besoins en évapotranspiration. Cela peut engendrer un déficit hydrique atmosphérique et éventuellement celui du sol si les arbres sont contraints de consommer plus d'eau que normalement. L'IHC projeté pour l'horizon 2041-2070 du RCP 8,5 de la région du Centre-du-Québec montre des valeurs négatives (figure 8.a) ce qui se traduirait par un déficit hydrique futur sur tout le territoire. Les valeurs de l'IHC les plus fréquentes du territoire se situent entre -4 et -7 environ (figure 8.b). Ces valeurs ont été utilisées dans la création de notre modèle géomatique (section 5). Même si les méthodes de calcul des prédictions du déficit hydrique atmosphérique entre l'organisme Ouranos (figure 8.c) et l'indice



8.a 8.b



8.c

Figure 8 : a- Différence de l'indice d'humidité climatique annuel entre l'horizon 1971-2000 et 2041-2070 du RCP 8,5 provenant des projections du Gouvernement du Canada pour la région du Centre-du-Québec; b- Histogramme de la fréquence du delta IHC de la figure 8a. c- Comparaison du déficit hydrique de la saison de croissance (précipitation – évapotranspiration) entre le scénario climatique RCP 4,5 (en bleu) et le scénario RCP 8,5 (en rouge) provenant des projections d'Ouranos (Figure adaptée de Logan 2017) ;

d'humidité climatique du Gouvernement du Canada (figure 8.a) sont différentes en certains points, nous pouvons constater que les tendances vers le négatif sont similaires.

Dans la perspective d'un scénario climatique ou les gaz à effet de serre continueraient d'augmenter (RCP 8,5) où l'occurrence des sécheresses estivales exceptionnellement longue sur plusieurs mois consécutifs deviendrait élevée, le risque de mortalité de certaines essences forestières les moins adaptées pourrait s'accentuer. Cela pourrait augmenter le risque de déclin prématuré des peuplements les plus exposés.

2.3.5 PLANIFICATION DES ACTIVITÉS FORESTIÈRES

Du point de vue de la planification forestière sur le territoire de l'Agence des Bois-Francs, il faut s'attendre à une durée annuelle plus longue de la période sans gel (qui n'est pas nécessairement la même chose que la saison de croissance). Les projections provenant d'Ouranos (Logan 2017) prévoient un automne plus long de 4 à 24 jours et un printemps plus hâtif de 6 à 17 jours selon les scénarios climatiques optimistes ou pessimistes (figure 9). Cela pourrait engendrer des complications non négligeables lors des travaux forestiers mécanisés. Un hiver plus court pourrait créer des saisons de transition plus longues et par conséquent, réduire le temps où la capacité de portance du sol est adéquate pour sortir le bois de la forêt. Une planification des travaux forestiers non adaptée à ces changements exposera les sols à des risques plus élevés d'ornières, de compaction et d'érosion. Ces enjeux seront d'autant plus importants s'il y a une augmentation de la fréquence des pluies torrentielles.

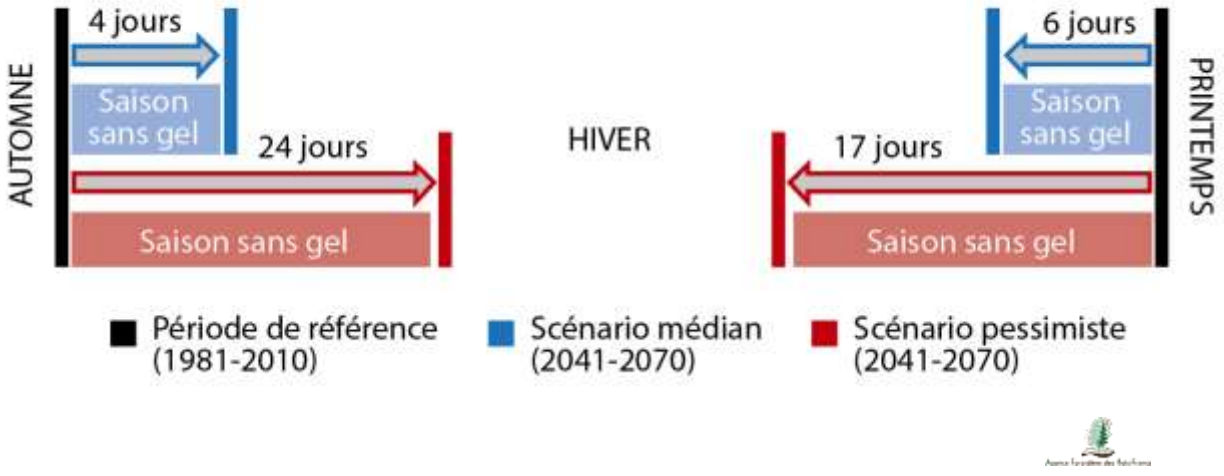


Figure 9 : Comparaison du nombre de jours du début de la saison sans gel (printemps) et de sa fin (automne) prévu pour la période de 2041-2070 entre le scénario climatique RCP 4,5 lié à des actions concrètes visant à réduire les gaz à effet de serre (en bleu) et le scénario RCP 8,5 lié à une absence d'action avant la fin du siècle (en rouge). Adaptation visuelle des informations connues sur la fin et le début de la saison sans gel de Logan 2017 (Ouranos).

3. LES EFFETS POTENTIELS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PEUPLEMENTS FORESTIERS AU CENTRE-DU-QUÉBEC

3.1 RELATION ENTRE LES ÉLÉMENTS FONDAMENTAUX DU SYSTÈME NATUREL

Un vocabulaire clair permet de nourrir les échanges de façon constructive. Le diagramme de Venn ci-dessous (figure 10) présente trois ensembles connus du système naturel utilisé dans l'étude des effets des changements climatiques sur un écosystème forestier. La gravité des effets des changements climatiques sur les peuplements ou le paysage dépend des propriétés du site, de la sensibilité physiologique de l'essence au stress, de sa capacité d'adaptation et du degré d'exposition au climat futur. Par exemple, si la température estivale est élevée pendant plusieurs mois, si la sensibilité physiologique de l'espèce est élevée, si son pouvoir d'adaptation est faible et par-dessus tout, si cette espèce est située sur un sol très mince, le risque à long terme de déclin est élevé. Si par contre sa capacité d'adaptation est élevée, sa résilience devient alors plus élevée et son risque de déclin diminue.

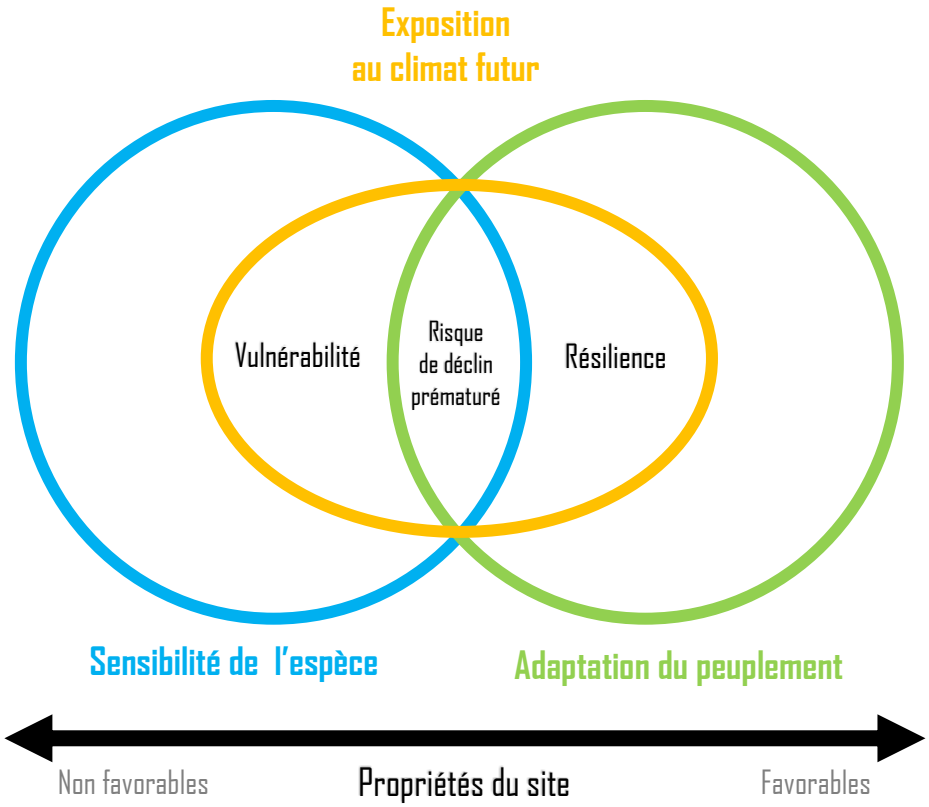


Figure 10 : Diagramme de Venn montrant les ensembles entre les éléments fondamentaux d'un système naturel.

3.1.1 VOCABULAIRE ESSENTIEL

ÉLÉMENTS PILIERS

L'exposition est l'action de soumettre une espèce ou un écosystème à l'action des intempéries climatiques ou d'agents biotiques de perturbation. Cela peut aussi identifier la position d'un versant ou d'une pente par rapport au soleil.

La sensibilité est l'aptitude des arbres à réagir aux modifications du milieu et aux effets de différentes sources de stress, comme la sécheresse, le froid et la chaleur, selon leurs attributs fonctionnels physiologiques. En regard de la sécheresse, la résistance et l'évitement de l'arbre aux embolies sont des attributs déterminants.

L'adaptation est le résultat des modifications permettant à une espèce de survivre et se reproduire dans un habitat modifié à la suite d'une perturbation. Il fait appel aux attributs de mode de reproduction, de dispersion des semences, de diversité biologique et de distance entre les écosystèmes.

ÉLÉMENTS D'ASSOCIATION

La vulnérabilité est la sensibilité physiologique d'un arbre aux effets négatifs des variations climatiques et de leurs extrêmes. La vulnérabilité dépend de la fréquence, de l'ampleur, de l'intensité et de la nature des perturbations, ou encore, de la vitesse des changements climatiques et des caractéristiques intrinsèques de l'arbre.

La résilience est la capacité d'un écosystème ou d'une espèce à absorber les perturbations et retrouver par la suite un fonctionnement ou un développement normal. La résilience est fonction du degré d'exposition aux changements climatiques et de la capacité d'adaptation d'une espèce ou d'un écosystème.

Le risque de déclin prématuré est la diminution de la qualité et de la vigueur d'un arbre ou d'un écosystème par des agents biotiques ou abiotiques de perturbation plus rapide que prévu. Il peut aussi représenter la détérioration des qualités physiques et chimiques du sol (dégradation du sol). Le risque varie en fonction de la capacité d'adaptation d'une espèce ou d'un écosystème, de sa sensibilité et du degré d'exposition aux changements climatiques.

3.2 AIRE DE RÉPARTITION DES ESSENCES FORESTIÈRES

Un des effets importants anticipés des changements climatiques sur les espèces forestières est la modification de leur **aire de répartition** (Bouchard et al. 2019). Les espèces qui se situent à la limite méridionale de leurs aires de répartition pourraient voir leur condition climatique devenir de moins en moins favorable à leur présence (Périé et al. 2014). Les travaux de Périé et al. 2014 indique que le réchauffement de la température de la province pourrait avoir un effet favorable sur la niche climatique de 90 espèces et un effet défavorable sur les 39 espèces actuellement en place. Cette possible hausse des températures de la province pourrait engendrer un climat favorable pour 29 espèces actuellement considérées exotiques. Le bouleau à papier, le sapin baumier, l'épinette noire, l'épinette blanche ainsi que le pin gris figurent parmi les espèces les plus menacées à vivre une période de mésadaptation face aux changements futurs du climat d'ici la fin du 21^{e} siècle (Périé et al., 2014). À l'opposé, les conditions climatiques futures de la région, selon cette même étude, pourraient être favorables à la niche climatique du chêne bicolore, du charme de Caroline et du faux-cyprès blanc. Pour ce qui est des autres espèces présentes au Centre-du-Québec, leurs conditions d'enveloppe climatique seront maintenues ou légèrement avantagées ou désavantagées sans pour autant mettre en péril leur présence au sein de la région. Bien que l'approche basée sur l'enveloppe climatique soit intéressante, elle ne tient pas compte de la probabilité de chacune des espèces de pouvoir coloniser une nouvelle aire de répartition et de s'établir en peuplement (Aubin et al. 2018). Ce ne sont pas toutes ces nouvelles espèces qui pourront s'installer étant donné des barrières de compétitivité de lit de germination disponibles (Colin, 2017). Ainsi, cette approche ne tient pas compte de certaines réalités de capacité de migration (Boivert-Marsh et al. 2021. Révision mineurs).; Solarik et al. 2020 ; Lafleur et al. 2010) et de germination, de compétition et de dynamique des stades de développement (Brown et al. 2014). Il est néanmoins intéressant, par cette approche, de constater que plusieurs espèces feuillues seront avantagées au point de vue climatique dans notre région (Brice et al. 2020).

3.3 SENSIBILITÉ DES ESSENCES FACE AUX SÉCHERESSES

Un autre effet important anticipé des changements climatiques sur les peuplements forestiers est l'augmentation de l'incidence de nouveaux régimes de stress. Les facteurs de stress les plus connus sont une récurrence plus élevée des sécheresses intenses et de longues durées (sécheresses exceptionnelles causant la mort des arbres), des orages violents et des microrafales provoquant les chablis, des pluies torrentielles et de la neige lourde brisant les cimes. La sensibilité physiologique de chacune des espèces influence la vulnérabilité des peuplements forestiers aux nouveaux stress climatiques. Chaque espèce possède un seuil de tolérance spécifique qui est défini par ses caractéristiques physiologiques ou morphologiques (traits fonctionnels). Afin qu'une espèce puisse survivre aux sécheresses, les recherches démontrent qu'elle doit au moins posséder les caractéristiques importantes suivantes (Aubin et al. 2016 ; Boivert-Marsh et al. 2020) :

A.	Un système racinaire profond pour aller chercher l'eau le plus loin possible lors d'un déficit hydrique;
B.	Un contrôle stomatique sensible qui puisse fermer les stomates avant que la déshydratation soit irréversible;
C.	Des vaisseaux du xylème à l'épreuve des embolies pour éviter la fragmentation de la colonne de sève qui provoque la mort de la partie de l'arbre affectée par les bulles d'air;
D.	Une importante réserve d'hydrate de carbone.

De ce fait, un arbre sain et vigoureux aura plus de chance de survivre à un épisode de sécheresse intense que son voisin éprouvant des difficultés de croissance avant même la période de stress. Ce fait est d'autant plus important qu'il met en relation la qualité du site et les chances de survie des arbres contraints par des stress climatiques importants.

4. ANALYSE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS MENACÉS PAR LES SÉCHERESSES DU CENTRE-DU-QUÉBEC

4.1 CONTEXTE

L'évaluation de la vulnérabilité des peuplements forestiers doit être intégrée aux activités d'aménagement forestier pour une adaptation efficace aux changements climatiques de la région. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'élaboration de la cartographie de la vulnérabilité des peuplements forestiers du Centre-du-Québec aux sécheresses. Comme il existe plusieurs niveaux d'intensité de sécheresse, nous avons ciblé les paramètres se rapportant au scénario climatique du RCP 8,5 expliqué à la section 2.1. Celui-ci suppose la possibilité d'un déficit hydrique climatique élevé ayant le potentiel d'engendrer des sécheresses mortelles pour plusieurs arbres et même catastrophique lorsque l'espèce est à un stade de développement plus sensible comme celui du gaulis. Nous avons été en mesure de travailler avec des indices publiés récemment par des chercheurs collaborateurs nous permettant d'intégrer ces indices aux données ouvertes dendrométriques du MFFP du quatrième inventaire. Une méthodologie générale est décrite à la section 5 et la méthodologie détaillée a été présentée en conférence à plusieurs reprises en 2020.

4.2 APPROCHE PRÉCONISÉE

Il existe plusieurs façons d'aborder les analyses de vulnérabilité, de résilience et de risque de déclin prématuré des peuplements, mais l'essentiel est de procéder par étape. Nous avons mis de l'avant des objectifs ainsi que trois étapes nécessaires (figure 14) à leur réalisation dans le but ultime de mettre en œuvre des solutions d'adaptation à moyen terme.

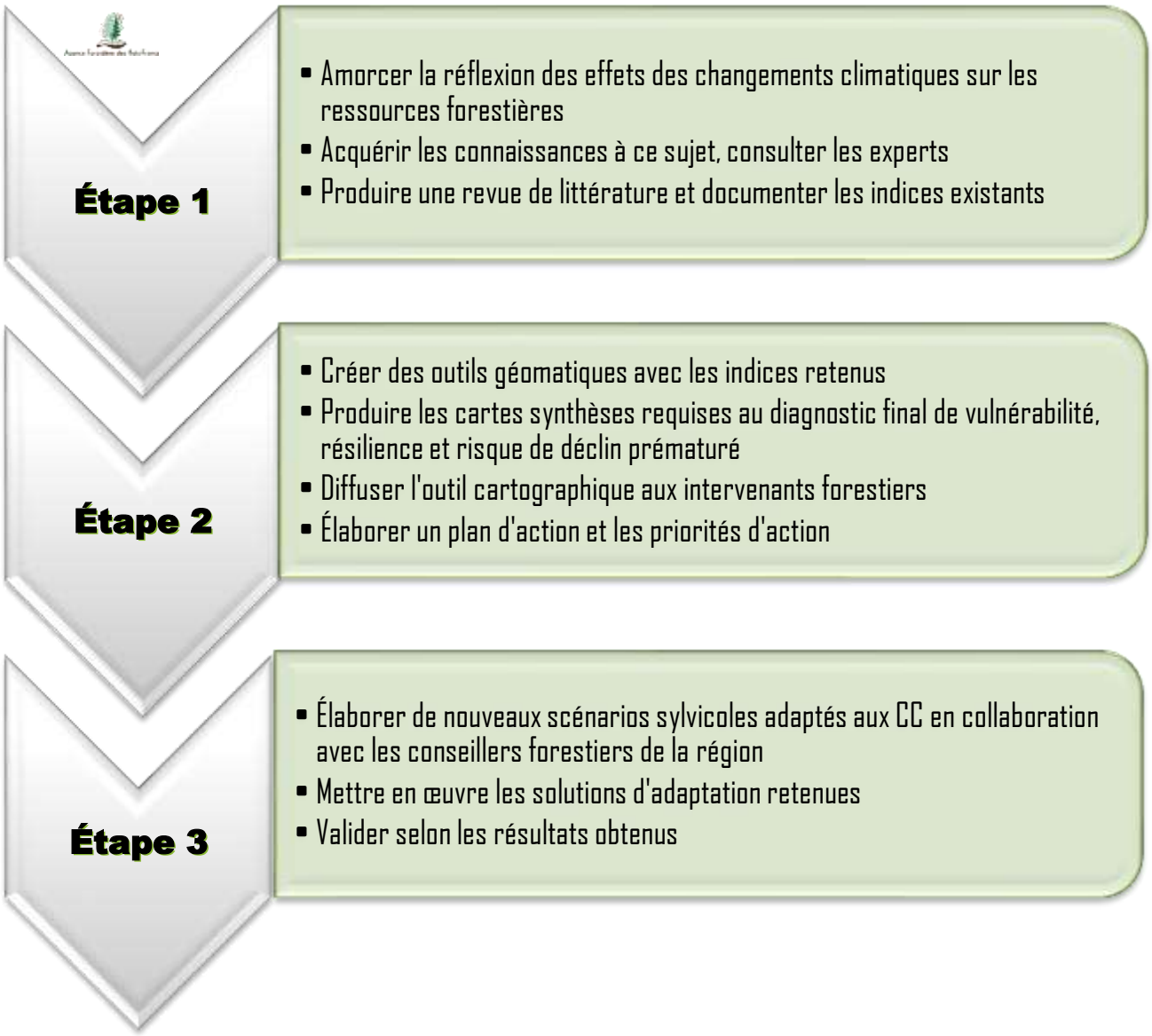
4.2.1 OBJECTIFS VISÉS

A. Fournir une information synthèse comportant les données disponibles les plus récentes

B. Identifier les zones du territoire les plus à risque des effets des sécheresse

C. Promouvoir ces outils aux acteurs œuvrant dans le domaine des milieux naturels de la région afin de les aider dans leur planification de travaux futurs

4.2.2 SYNTHÈSE DES ÉTAPES DE RÉALISATION



4.3.1 ÉTAPE 1 – BILAN DES CONNAISSANCES ET DES INDICATEURS DISPONIBLES

Dans un premier temps, il est nécessaire de faire le bilan des connaissances sur les effets des changements climatiques jusqu'à ce jour appliquées aux ressources forestières. La création de la revue de littérature s'intègre bien à cette étape et permet des échanges constructifs autour d'une base commune et motive des réflexions plus approfondies.

4.3.2 ÉTAPE 2 – MISE EN PLACE D'UN OUTIL GÉOMATIQUE

Nous avons rassemblé des variables pertinentes pour chacun des quatre sous-indices importants dans l'analyse des effets de la sécheresse sur les peuplements forestier. Les quatre sous-indices utilisés pour produire les outils d'analyse finaux de la vulnérabilité, de la résilience et du risque de déclin prématuré face aux sécheresses du Centre-du-Québec sont définis à la figure 11 ci-dessous. La qualité des sous-indices d'analyse a été prioritaire dans notre démarche. Des chercheurs reconnus dans le domaine des changements climatiques nous ont offert généreusement leur support.

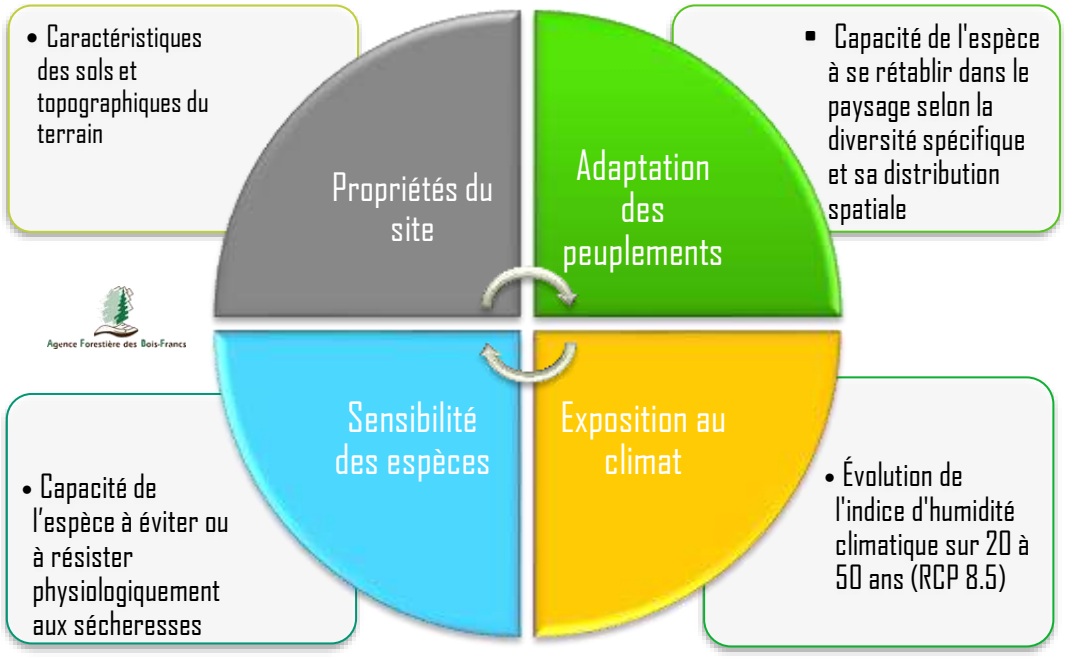


Figure 11 : Schéma synthèse des quatre sous-indices pour la création des indices d'analyse de la vulnérabilité, de la résilience et du risque de déclin prématuré des peuplements forestiers à la sécheresse du Centre-du-Québec. Les couleurs sont en harmonie avec la figure 10.

4.3.3 ÉTAPE 3 - MESURES D'ADAPTATIONS SYLVICOLES

Des moyens seront élaborés pour appuyer les actions ciblées et atteindre les objectifs d'adaptation visés de chacun des trois axes prioritaires du plan d'action (section 8). La participation des conseillers forestiers de la région sera sollicitée. Cela pourra prendre la forme de scénarios sylvicoles adaptés aux différents niveaux de vulnérabilité des peuplements à la sécheresse. Nous savons qu'il n'y a pas que les sécheresses comme stress anticipés pour le futur, mais cet exercice est primordial pour ancrer de nouveaux réflexes et une vigilance accrue face aux nouveaux défis qu'imposeront les CC dans les activités d'aménagement.

5. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DES ANALYSES

5.1 INTRODUCTION

L'analyse de la vulnérabilité des peuplements forestiers de la région du Centre-du-Québec a nécessité le jumelage de données provenant de plusieurs sources et une attention particulière a été portée au choix des données de base. Le tableau 3 décrit en détail toutes les sources de données. Les différentes variables ont été traitées comme intrants à la création des sous-indices et les indices finaux ont été créés par associations de sous-indices. Il est possible de visualiser ces associations dans le schéma structurel de la figure 12. Enfin, la simplicité a été dans la création des outils géomatiques, car le principal objectif était de rendre facilement reproductible le cheminement derrière le résultat pour que les intervenants du milieu naturel puissent l'utiliser facilement et l'améliorer au besoin.

5.2 INDICES, SOUS-INDICES ET VARIABLES

5.2.1 LES INDICES

Les indices ont été produits en faisant la moyenne arithmétique des sous-indices sans donner de poids différents à un sous-indice en particulier. Les trois indices sont composés des sous-indices de bases de l'exposition des peuplements à l'évolution de l'indice d'humidité climatique ainsi que l'exposition édaphique et topographique. Le premier outil est l'analyse de la vulnérabilité des peuplements à la sécheresse. Il est composé des caractéristiques fonctionnelles de chacune des espèces en plus des deux sous-indices de base. Le deuxième outil est la résilience des paysages à la sécheresse. Celui-ci prend en considération l'adaptation des peuplements à l'échelle du district écologique en plus des deux sous-indices de base. Le troisième outil est le niveau de risque de déclin prématuré des peuplements forestiers qui regroupe à la fois le sous-indice de la vulnérabilité et celui de l'adaptation en plus des deux sous-indices de base.

5.2.2 LES SOUS-INDICES

Les données dendrométriques sur les peuplements de sept mètres et plus proviennent du quatrième inventaire écoforestier du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. C'est à partir de cette source de données que nous avons pu isoler par peuplement les volumes/ha ou les tiges/ha pour chaque espèce, des variables forestières à la base de la création des sous-indices.

1. Afin de calculer le sous-indice de **l'exposition du terrain** nous avons utilisé les données matricielles des caractéristiques texturales des sols de la région des travaux de l'étude de Sylvain J.D. et al. 2021 (en révision). Cette base de données permet d'obtenir un portrait statistique validé de la texture du sol à une résolution de 250 m le pixel. Toutefois, elle n'offre pas la possibilité de différencier la granulométrie des sables (grossiers ou fins), un attribut physique supplémentaire dans la capacité de rétention de l'eau des sols. Seule une vérification sur le terrain peut permettre d'apporter plus de précision sur ce point. En effet, il est reconnu qu'un sable fin retiendra mieux l'eau qu'un

sable grossier. Dans cette matrice, la tranche de profondeur de 30 à 60 cm a été sélectionnée pour définir la texture du sol. Cette tranche de profondeur donne accès à la majorité des sols argileux, soit 31 623 unités. Toutefois, nous avons une perte de 1 226 unités qui se retrouvent dans les tranches de 15 à 30 cm et de 60 à 100 cm. Nous avons transformé ces données de texture en une variable de capacité de rétention de l'eau dans le sol (anglais : AWSC (MABC 2015)) en millimètres d'eau par mètre de sol. Ensuite, nous avons isolé les dépôts de surface minces à très minces et le roc en utilisant les types écologiques qui finissaient par un 0 ou lorsque disponibles, ceux identifiés par un dépôt de surface M1A, R1A et R. Les polygones résultant de cette sélection ont ensuite été convertis en données matricielles et ont été intégrés à la matrice texturale des sols. Ensuite, nous avons utilisé une mosaïque des modèles numériques de terrain dérivés du Lidar pour le territoire à l'étude et nous avons calculé une nouvelle variable de la contribution de l'eau de surface en fonction de la topographie (anglais : TWI (Sorensen et al. 2006)). Le modèle numérique de terrain a aussi été utilisé pour discriminer les endroits où les pentes étaient inclinées de 20 % et plus avec une orientation au sud. Ces sites sont généralement les plus exposés aux sécheresses en raison de la radiation plus élevée (Stage et Salas, 2012). L'indice d'exposition du terrain met donc en relation la variable de rétention de l'eau dans le sol, la variable de contribution de l'eau de surface selon la topographie, et la variable combinée de l'inclinaison et d'orientation de la pente.

2. Afin de calculer le sous-indice de **la sensibilité physiologique** des espèces, nous avons fait l'acquisition des valeurs de résistance et d'évitement à l'embolie de l'étude des 24 espèces forestières de l'est du Canada de Boisvert-Marsh et al. (2020). Pour chaque peuplement d'arbres de 7 m et plus, nous avons calculé la proportion de chaque espèce à partir du ratio de son volume/ha par rapport au volume/ha total du peuplement. Cette proportion nous a permis de pondérer la sensibilité de chaque espèce au sein d'un peuplement. Les espèces n'ayant pas de mesure de sensibilité ont quand même été incluses dans le volume/ha total du peuplement. De ce fait, une évaluation de l'erreur engendrée par ces espèces a été réalisée et elle dépasse rarement 5 m^3/ha.

3. Afin de calculer le sous-indice de **l'adaptation des peuplements,** nous avons utilisé l'équation de Shannon-Weiner de diversité spécifique en pondérant chaque espèce par peuplement. Pour compléter cet indice de diversité, nous avons effectué une analyse de distribution spatiale par espèce. Lorsque la distribution est faible, cela indique un morcellement de l'unité de paysage et vient donc atténuer l'effet de la diversité. Afin de mieux représenter les nuances à l'échelle du paysage, nous avons découpé le territoire en districts écologiques. Celui-ci est défini comme une portion de territoire caractérisée par des attributs singuliers reliés au relief, à la géologie, à la géomorphologie et à la végétation régionale. Ensuite, nous avons inséré dans le modèle les variables de rétablissement par espèce de Boisvert-Marsh et al. (2020) de la même façon que pour le sous-indice de la sensibilité physiologique.

4. Afin de construire le sous-indice **d'exposition à l'évolution de l'indice d'humidité climatique (IHC),** nous avons fait l'acquisition des données matricielles relatives à l'indice d'humidité climatique (IHC) du scénario climatique RCP 8,5 pour la période de référence 1971 à 2000 et la période future de 2041 à 2070 du département des Ressources naturelles du Canada. La différence

entre l'IHC de 2041-2070 et l'IHC de 1971-2000 est notre sous-indice d'évolution du climat. Il n'y a pas d'autres données climatiques incluses.

5.2.3 DÉTERMINATION DES CLASSES

Nous avons déterminé cinq classes de valeurs pour tous les sous-indices à l'exception du risque de déclin prématuré où il y en a trois. Ce choix a été fait pour deux raisons : a) assurer un affichage convivial de l'information sur les cartes, b) faire ressortir les zones qui se démarquent par rapport à l'ensemble du territoire du Centre-du-Québec. Ces cinq classes ont été déterminées en fonction de l'information générée par l'histogramme de données géomatiques vectorielles des valeurs de la carte qui avait la forme d'une cloche. Selon l'indice, la droite et la gauche de la cloche définissaient les classes faible ou élevée, les extrêmes à droite et à gauche étaient les classes très faible ou très élevée et le centre définissait la classe moyenne. Il n'est donc pas possible de comparer les valeurs entre deux territoires différents de la province, mais il est possible de comparer des éléments à l'intérieur de la région.

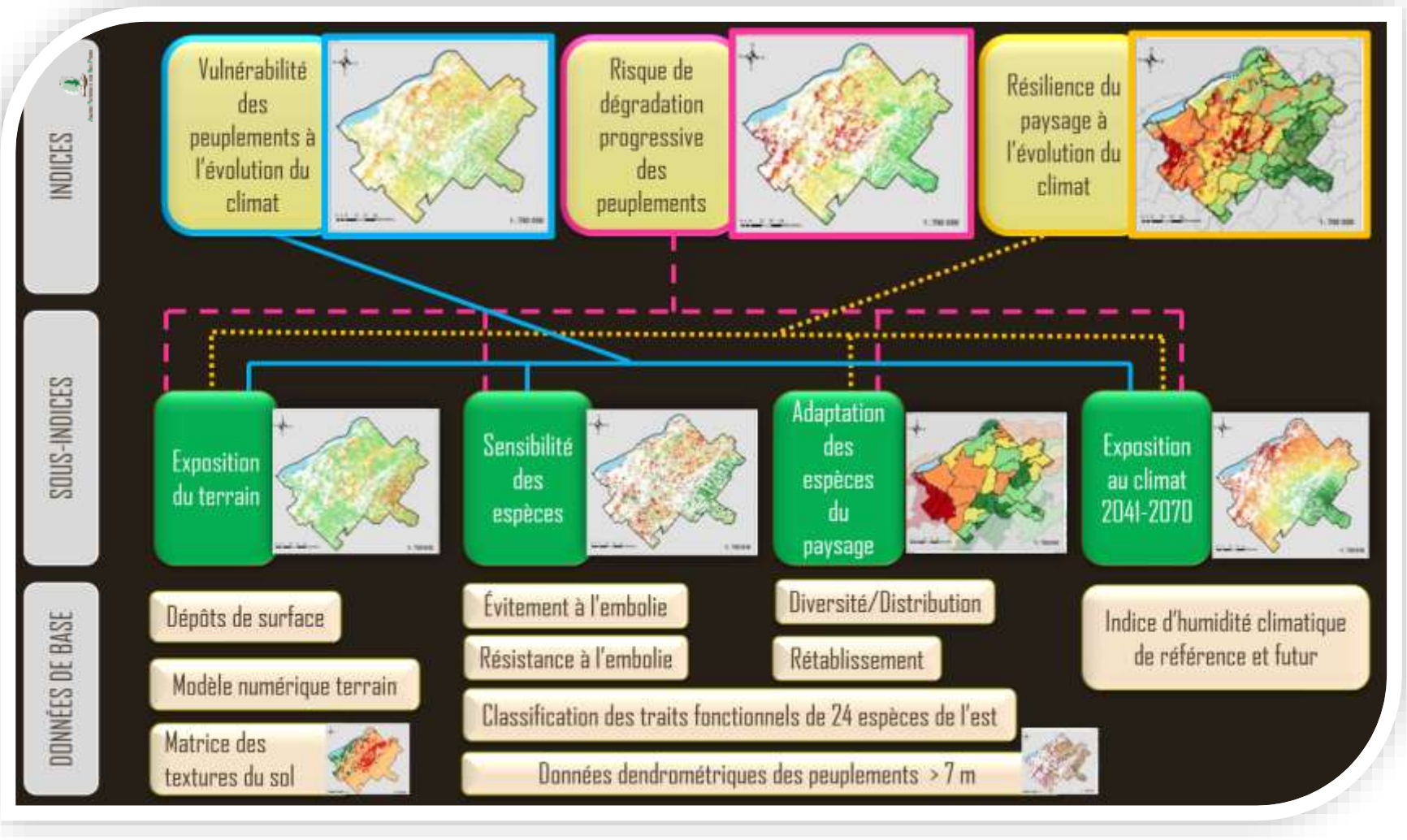


Figure 12 : Schéma structurel et associatif des indices, sous-indices et des bases de données qui ont permis l'analyse des peuplements du Centre-du-Québec.

Tableau 3 : Références des variables utilisées à la création des outils géomatiques dans l'analyse de vulnérabilité des peuplements forestiers du Centre-du-Québec.

Sous-indices	Indicateurs	Données	Variables	Sources des données utilisées	Détails géomatiques
Exposition du terrain	Caractéristiques édaphiques	Dépôt de surface	Sols minces et très minces	Données Québec www.donneesquebec.ca	Isolement des dépôts RIA+MIA+R existant sur le territoire
		Classe texturale	Catégorie 30-60 cm de profondeur	Sylvain J.-D., Anctil F., Thiffault E. Under review. Using ensemble modelling and bias correction for predictive mapping and related uncertainty: a case study in digital soil mapping.	Résolution originale de 250m x 250 m
			Capacité de rétention de l'eau dans le sol (anglais : AWSC)	Ministry of Agriculture of British Colombia. 2015. Water Conservation Factsheet no 619.000-1	
	Caractéristiques topographiques	Modèle numérique de terrain (MNT)	Élévation	Forêt ouverte www.foretouverte.gouv.qc.ca	Résolution originale de 1 x 1 m, mais changement d'échelle à 30 m pour l'orientation et la pente
			Indice topographique de la contribution de l'eau de surface (anglais : Topographical Wet Index)		Outils SAGA QGIS TWI Sorensen R., Zinko U., Seibert J. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. Hydrology and Earth System Sciences 10, 101-112.
Sensibilité des espèces	Évitement de l'embolie	Profondeur et architecture des racines	Valeurs basées sur un classement relatif de 24 espèces forestières de l'est	Boisvert-Marsh, L., S. Royer-Tardif, F. Doyon, P. Nolet, and I. Aubin. 2020. Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in Eastern Canada and inform adaptation practices. Forests 11: 989.	Volume/ha/espèces pondérées par peuplement avec les données dendrométriques du 4e inventaire
	Résistance à l'embolie	Potentiel hydrique à 50 %			
		Temps nécessaire pour la fermeture des stomates			
Adaptation du paysage	Diversité spécifique	Abondance et distribution spatiale des espèces par district	Shannon-Weiner Distance standard	Deux formules connues accessibles sur le web	Outils ARCGIS SDw Volume/ha/espèces pondérées par district avec les données dendrométriques du 4e inventaire
	Rétablissement	Capacité de rejet et de germination	Valeurs basées sur un classement relatif de 24 espèces forestières de l'est	Boisvert-Marsh, L., S. Royer-Tardif, F. Doyon, P. Nolet, and I. Aubin. 2020. Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in Eastern Canada and inform adaptation practices. Forests 11: 989.	Tiges/ha/espèces pondérées par district avec les données dendrométriques du 4e inventaire décennal
Exposition au climat	Indice d'humidité climatique (IHC) (anglais : CMI)	Différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle	Écart entre 1971 à 2000 et 2041 à 2070 ou RCP 8,5	McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., Owen, T. 2011. Customized spatial climate models for North America. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(12), 1611-1622.	Résolution originale de 10 km x 10 km

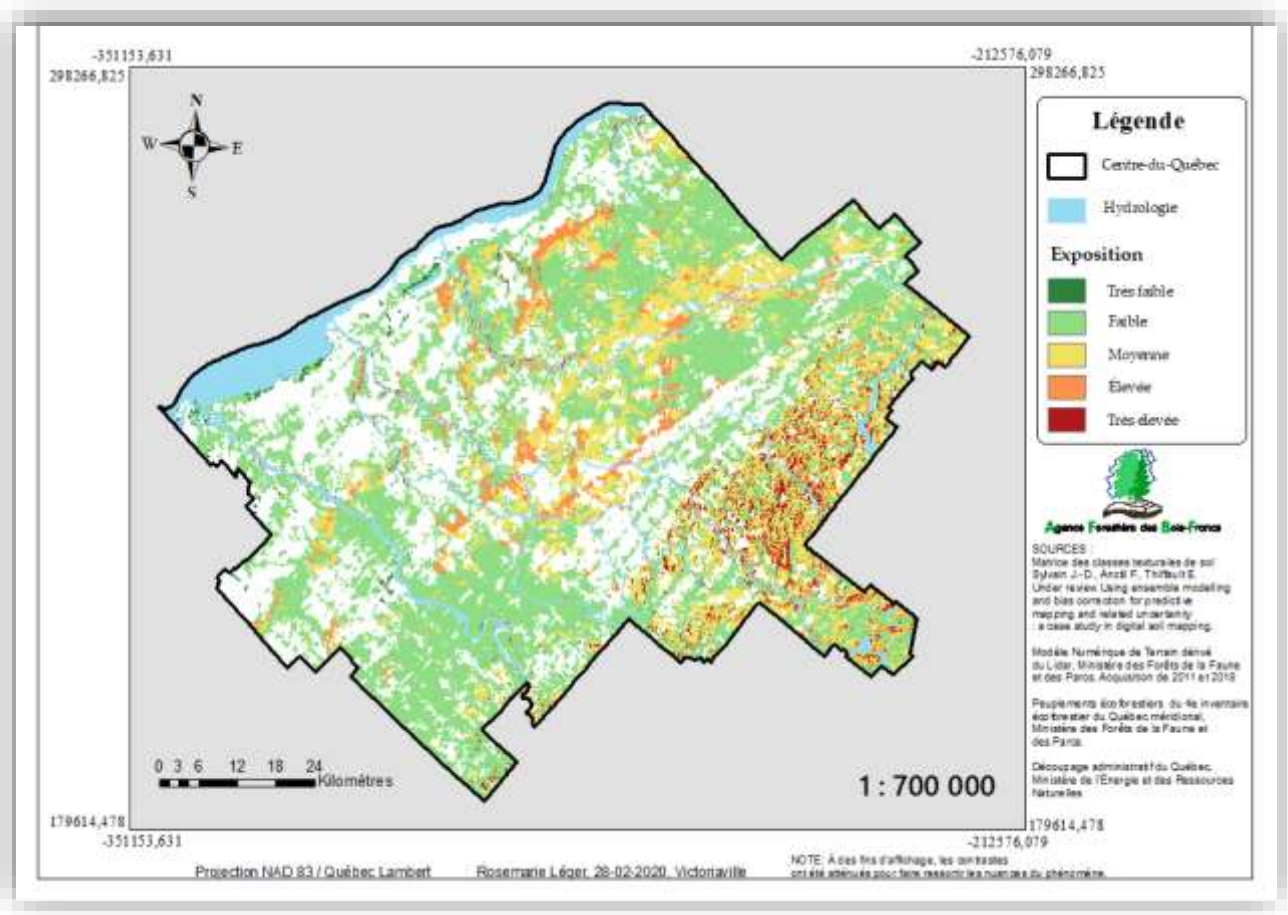
6. RÉSULTATS DES SOUS-INDICES ET DES INDICES GÉOMATIQUES ET DISCUSSION

6.1 LES CARTES DES SOUS-INDICES

Nous avons créé plusieurs sous-indices pour faire nos analyses telles que décrites dans la méthodologie. Nous vous présentons ces sous-indices afin qu'ils puissent vous aider à faire vos propres réflexions lorsque vous visualisez les indices synthèses plus loin dans le document.

6.1.1 L'EXPOSITION DU TERRAIN

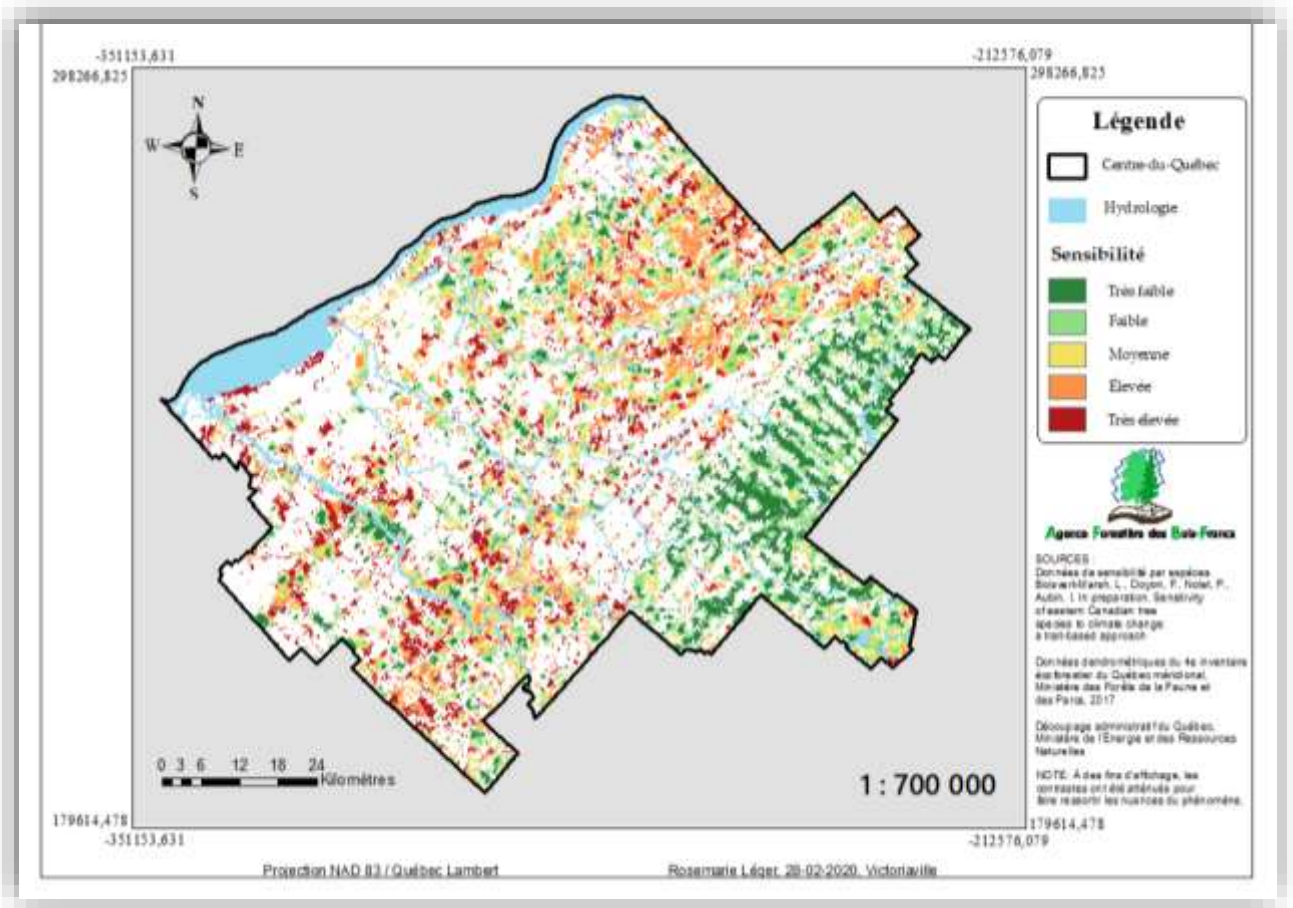
Carte 4 : Exposition du terrain selon les caractéristiques physiques des peuplements forestiers du Centre-du-Québec.



La carte 4 montre dans la région écologique des Appalaches la présence des sols minces et très minces exposés au sud cardinal avec plus de 20 % de pente (en rouge). Ceux-ci engendrent une exposition plus élevée au déficit hydrique que peut subir la végétation en place lors d'un épisode de sécheresse prolongée. Il est aussi possible de constater les zones où le sable loameux est présent, mais avec des niveaux d'exposition qui varient selon la contribution de l'eau de surface (Topographical Wet Index en anglais). La MRC de Drummond possède la plus grande proportion de sols faiblement exposés aux futures sécheresses et les Appalaches, une proportion élevée de pentes ayant un sol mince à très mince d'orientation sud.

6.1.2 LA SENSIBILITÉ DES ESPÈCES AUX SÉCHERESSES

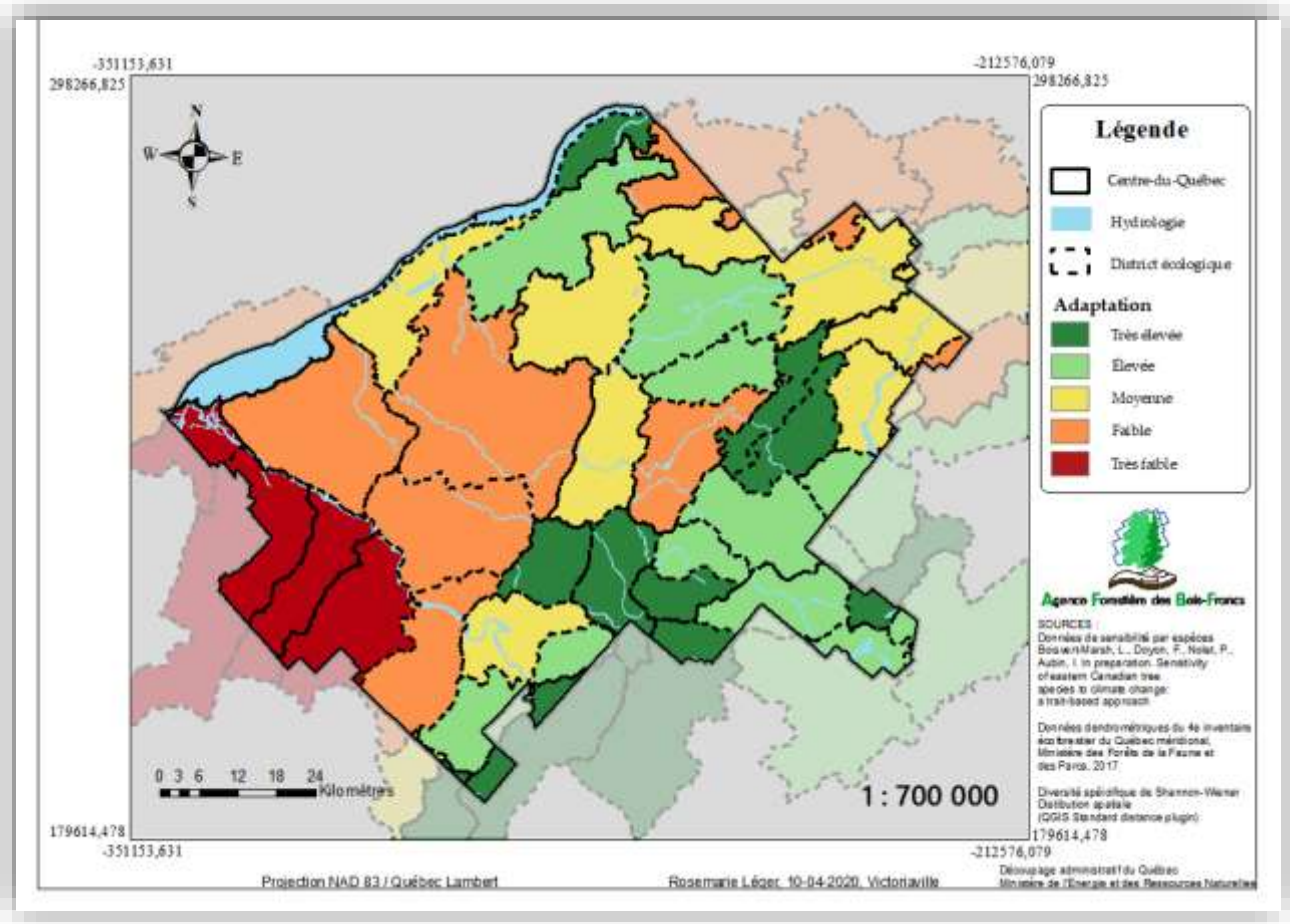
Carte 5 : Sensibilité physiologique à la sécheresse par espèces des peuplements forestiers du Centre-du-Québec.



La carte 5 démontre que les peuplements les plus sensibles se retrouvent dans la région écologique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les Appalaches ont des forêts de composition moins sensibles aux futures sécheresses, mais sont aussi plus à l'abri de l'évolution du climat. Une analyse plus détaillée a été réalisée pour l'indice de vulnérabilité qui est composé du sous-indice de sensibilité.

6.1.3 L'ADAPTATION DU PAYSAGE AUX SÉCHERESSES

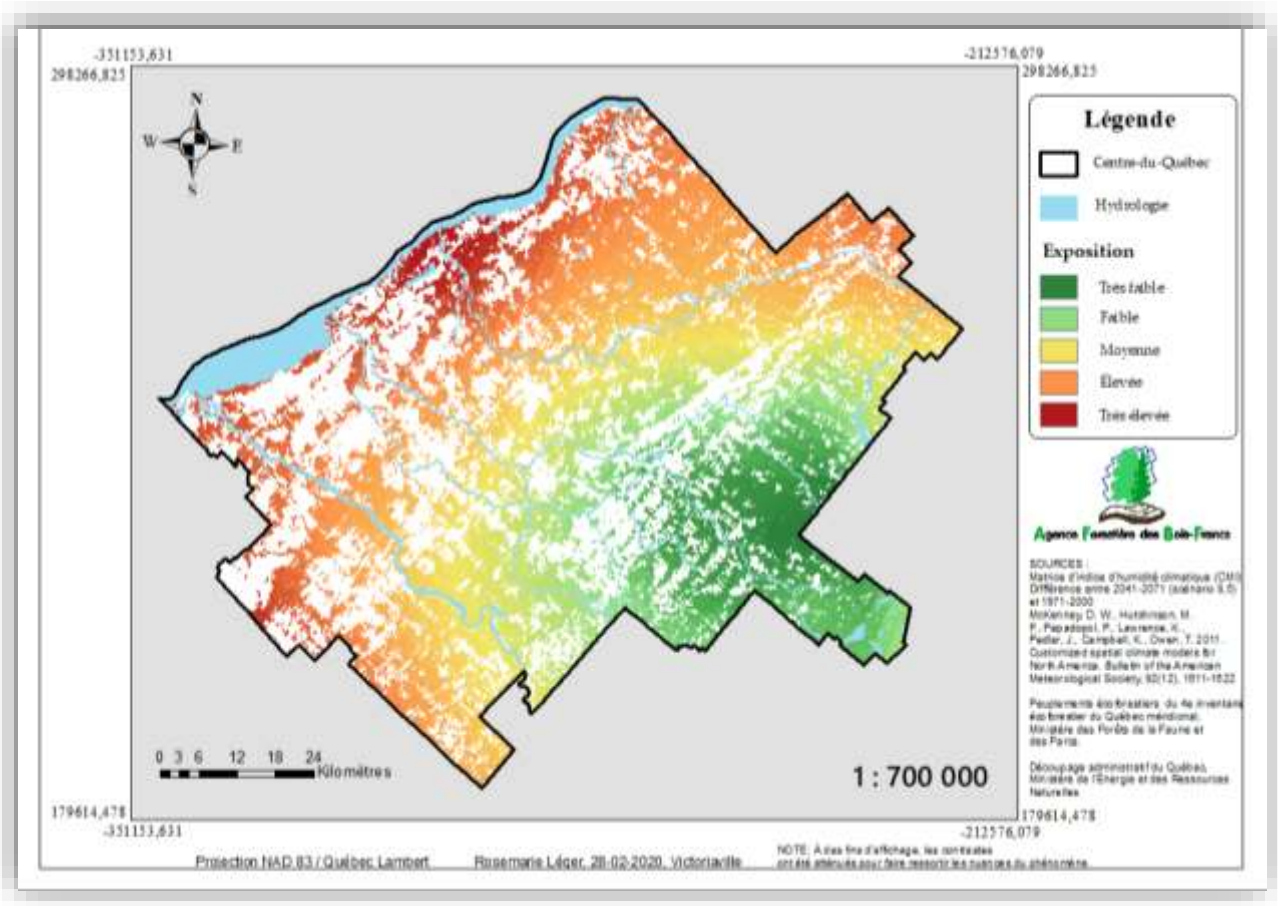
Carte 6 : Adaptation des peuplements aux sécheresses regroupés par district écologique (paysage local) du Centre-du-Québec.



La carte 6 présente les secteurs du Centre-du-Québec où l'adaptation des forêts sera plus difficile dans le futur. Les MRC de Drummond et de Nicolet-Yamaska seront les moins adaptées en fonction de leur distribution spatiale, leur diversité et leur rétablissement dans le temps. Afin de percevoir plus facilement les nuances de ce sous-indice, nous avons fait l'analyse à l'échelle du district écologique. Cette échelle permet de mieux visualiser la variabilité spatiale du paysage qui est plus conviviale.

6.1.4 L'ÉVOLUTION DE L'INDICE D'HUMIDITÉ CLIMATIQUE

Carte 7 : Évolution du climat en fonction de la différence entre les valeurs de l'humidité climatique historiques (1971-2000) et futures (2041-2070) du scénario climatique RCP 8,5.



La carte 7 montre que l'aridité du climat se fera ressentir davantage en bordure du fleuve ainsi que vers la Montérégie au sud-ouest. Ainsi, les MRC de Nicolet-Yamaska, Drummond et Bécancour seront les plus touchées par l'augmentation de la température et les baisses de précipitations qui pourraient engendrer un stress hydrique atmosphérique difficile pour certaines espèces.

6.2 LES CARTES DES INDICES

Les trois indices d'analyse synthèse des peuplements permettent d'avoir une vue d'ensemble de la dynamique future (2041 à 2070) du paysage forestier du Centre-du-Québec. Les intervalles des classes de couleur ont été répartis spécifiquement pour le territoire donc les seuils seraient différents à une autre échelle du territoire. Ainsi, il n'est pas possible de comparer des régions entre elles avec cet outil, mais bien des éléments à l'intérieur de notre région. Il faut préciser que la classe de couleur orange comporte plus d'incertitude que les autres classes placées aux extrémités de la classification. Ainsi, les observations sur le terrain seront déterminantes pour tirer des conclusions plus précises sur la réponse des peuplements de ces secteurs au futur climat.

6.2.1 LA VULNÉRABILITÉ DES PEUPLEMENTS AUX SÉCHERESSES

La connaissance de la vulnérabilité des peuplements forestiers en fonction du seuil de sensibilité physiologique de chaque espèce au nouveau climat est une étape importante à la compréhension des effets des CC sur les forêts. L'analyse de la vulnérabilité nous montre que les groupements d'espèces les plus présents sur le territoire sont aussi les plus vulnérables à la sécheresse. Cet enjeu sera pris en considération dans les futures réflexions des scénarios sylvicoles adaptés. Dans cette section, nous présentons les résultats de façon plus globale. La carte 8 montre les gradients de la vulnérabilité sur le territoire du Centre-du-Québec.

À la suite de nos analyses, nous constatons qu'une plus grande proportion de peuplements résineux à une faible vulnérabilité (figure 13). Cela peut s'expliquer par certains faits notables. Premièrement, la superficie totale de ces peuplements forestiers résineux est confinée en majorité dans

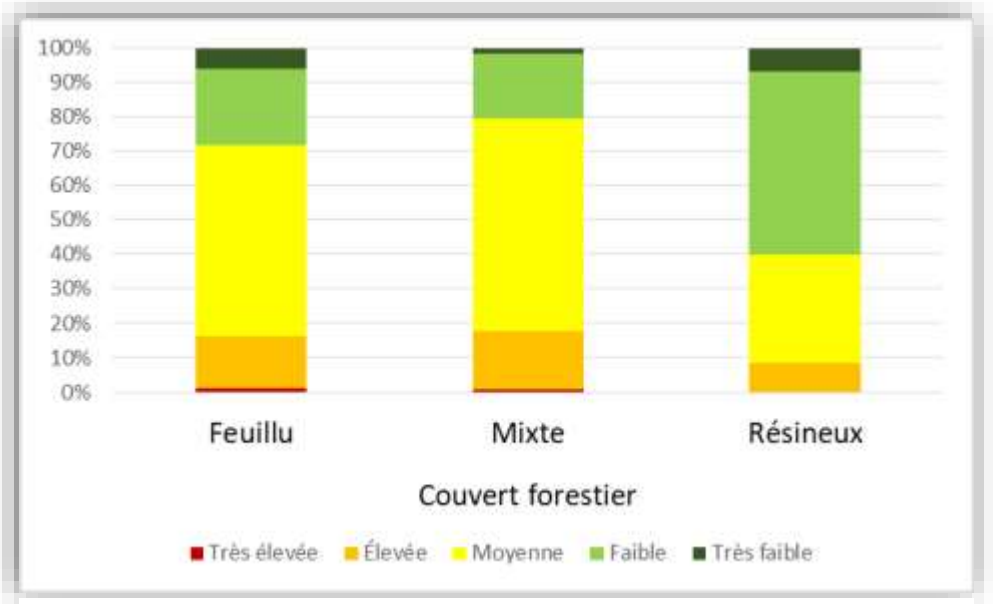


Figure 13 : Proportion relative des classes de la vulnérabilité à la sécheresse par types de couvert forestier du Centre-du-Québec.

la région des Appalaches où leur exposition à l'évolution du climat n'est pas élevée. Deuxièmement, dans cette région écologique, les peuplements résineux sont composés, en général, de plantations d'épinettes blanches et d'épinettes rouges naturelles. Ces deux espèces sont moins sensibles à la sécheresse en termes de caractéristiques physiologiques que le sapin baumier situé dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL). En effet, le sapin baumier des BTSL pousse souvent sur des sables subhydriques et est soumis à une exposition plus élevée à l'évolution du climat que celle des Appalaches. Les peuplements mixtes, qui couvrent 38 % de tous les peuplements forestiers du Centre-du-Québec, se retrouvent principalement dans les BTSL. Ils sont généralement composés d'érables rouges et de sapins baumiers, soit des espèces sensibles à la sécheresse. Lorsque ces espèces sont jumelées à la combinaison de deux autres indices élevés, soit l'exposition du terrain (par ex. un sable loameux) et l'exposition au climat (par ex. une zone située à proximité du fleuve), cela engendre une vulnérabilité élevée des peuplements forestiers.

De ce fait, la MRC d'Arthabaska possède la plus grande proportion de superficie de peuplements faiblement vulnérables (figure 14). À l'opposé, la MRC de Bécancour présente une grande proportion de peuplements vulnérables suivie de près par la MRC de Nicolet-Yamaska. Cela s'explique par la proximité du fleuve qui augmente l'exposition à l'évolution du climat et par la présence de peuplements composés d'espèces plus sensibles. Dans la MRC de Bécancour, la vulnérabilité des peuplements résineux composés de sapins baumiers est d'autant plus grande partout où le sable loameux est présent. Ces deux sous-indices réunis sont suffisants pour influencer à la hausse la vulnérabilité même si l'état du terrain est en général bon. Dans la MRC de Drummond, les espèces sont majoritairement sensibles, mais l'exposition de l'évolution du climat est plutôt médiane. Cela est suffisant pour engendrer une incertitude des effets de CC. Pour cette MRC, il sera nécessaire d'assurer un suivi particulier de l'évolution des peuplements dans le temps.

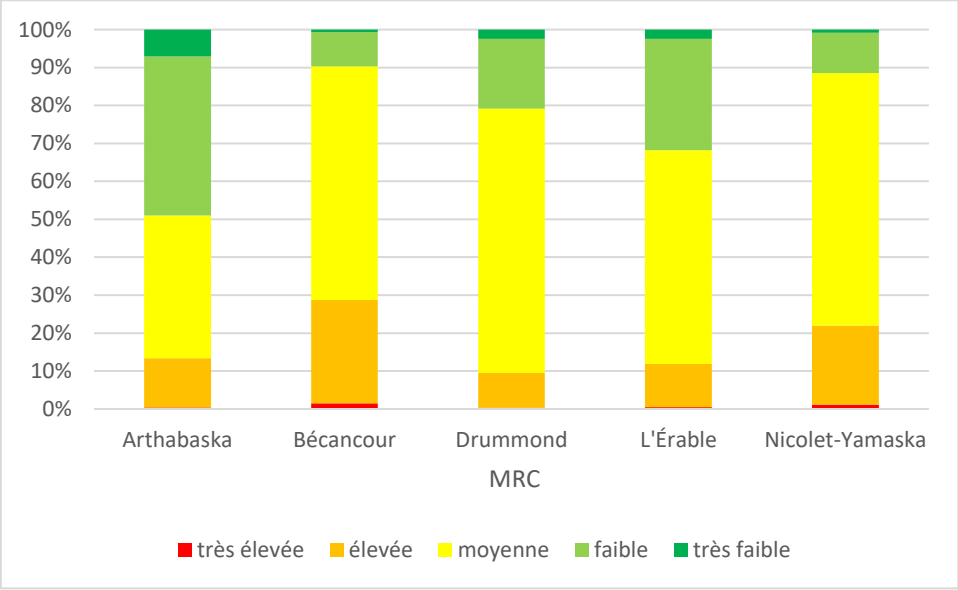
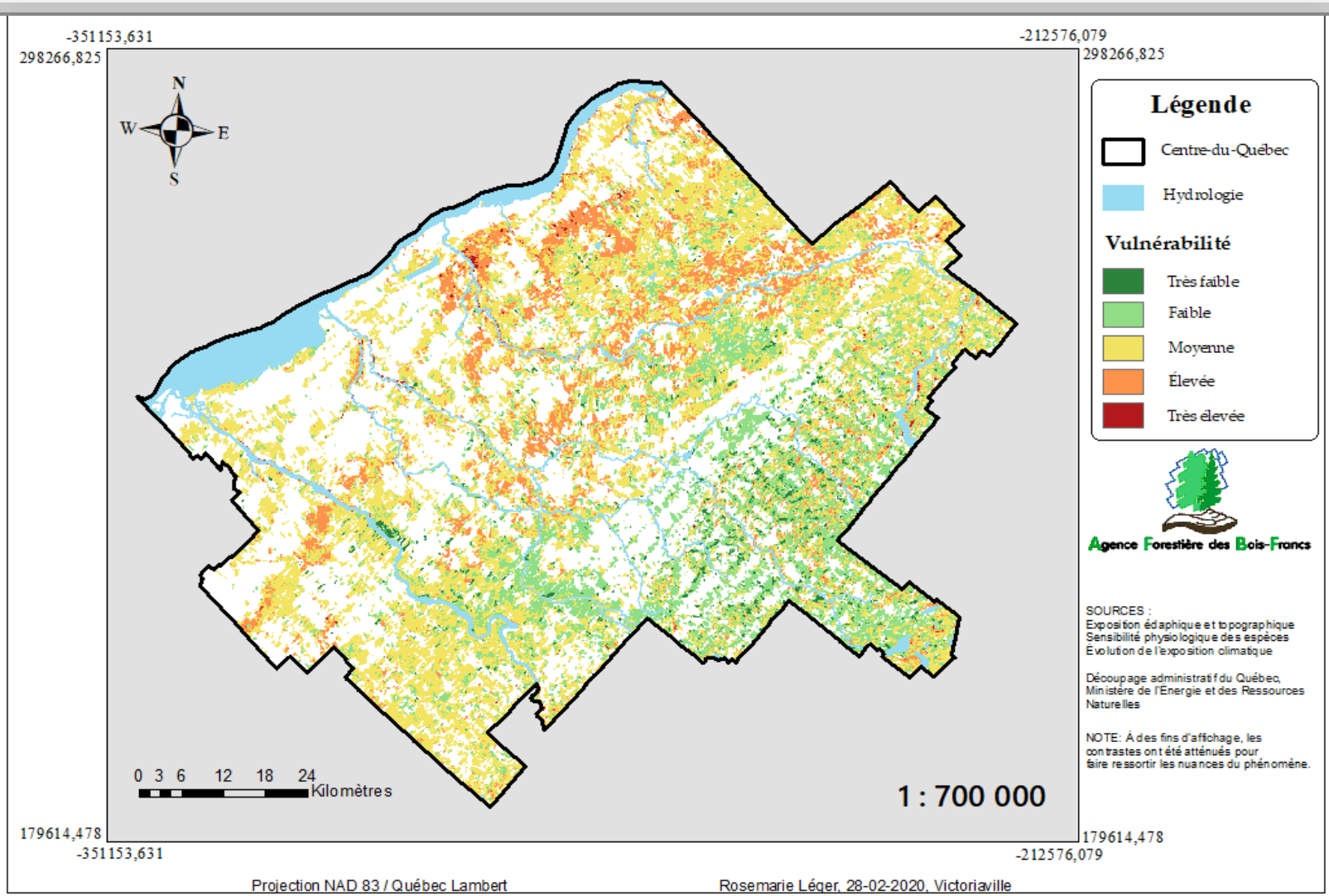


Figure 14 : Proportion relative des classes de la vulnérabilité à la sécheresse des peuplements forestiers de chacune des MRC du Centre-du-Québec.

En conclusion, les deux régions écologiques couvrant le Centre-du-Québec (Appalaches et BTSL) montrent une vulnérabilité différente (carte 8). Celle des BTSL est plus élevée, mais possède une grande proportion de peuplements forestiers ayant une vulnérabilité classée moyenne, ce qui engendre une nécessité de raffiner l'analyse à ces endroits et d'aller vérifier sur le terrain. Les groupements d'essences les plus vulnérables comme l'érable rouge et le sapin baumier sont aussi les plus représentés des forêts centricoises. Toutefois, une incertitude existe et il sera pertinent de suivre ces peuplements dans le temps. Au sujet du couvert forestier, les peuplements résineux ont une proportion plus grande de forêts classées de faible vulnérabilité. Au point de vue des MRC, celle de Bécancour possède une plus grande superficie de forêts vulnérables que les autres. Dans cette optique, il est pertinent de raffiner l'analyse en s'intéressant à d'autres indices comme la résilience de ces forêts et leur risque de déclin prématuré des sections suivantes.

Carte 8 : Vulnérabilité des peuplements forestiers aux sécheresses du Centre-du-Québec prévue d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario climatique RCP 8,5 du Centre-du-Québec.



6.2.2 LA RÉSILIENCE DES PAYSAGES AUX SÉCHERESSES

La connaissance de la résilience des paysages à la sécheresse nous permet de comprendre lesquels de ceux-ci pourraient émerger à la suite d'un évènement majeur de sécheresse. Leur niveau de résilience dépend de la façon dont ils peuvent s'adapter à l'évolution du climat. La carte 9 nous montre que ce ne sont pas tous les paysages qui pourraient être prêts à se rétablir à la suite d'un changement futur du climat. Par exemple, la MRC de Nicolet-Yamaska et de Drummond présentent une proportion plus importante du paysage très faiblement résilient (figure 15) en raison de quelques facteurs importants. Premièrement, le paysage est très fragmenté par l'agriculture ce qui crée une distance non négligeable entre les peuplements. Cette distance peut ralentir le processus d'échange de graines effectué par le vent et les animaux. En second, ces paysages possèdent des peuplements avec une faible diversité d'espèces. Lorsque la diversité est faible, la palette d'opportunité du paysage à revenir à un état de santé optimale après un stress climatique grave est plus restreinte. Chaque espèce possède des attributs spécifiques qui peuvent devenir bénéfiques pour les autres espèces. Ainsi, lorsqu'il y a une grande diversité, il y a plus de chance de maintenir en place un paysage forestier dans le temps face à un climat incertain.

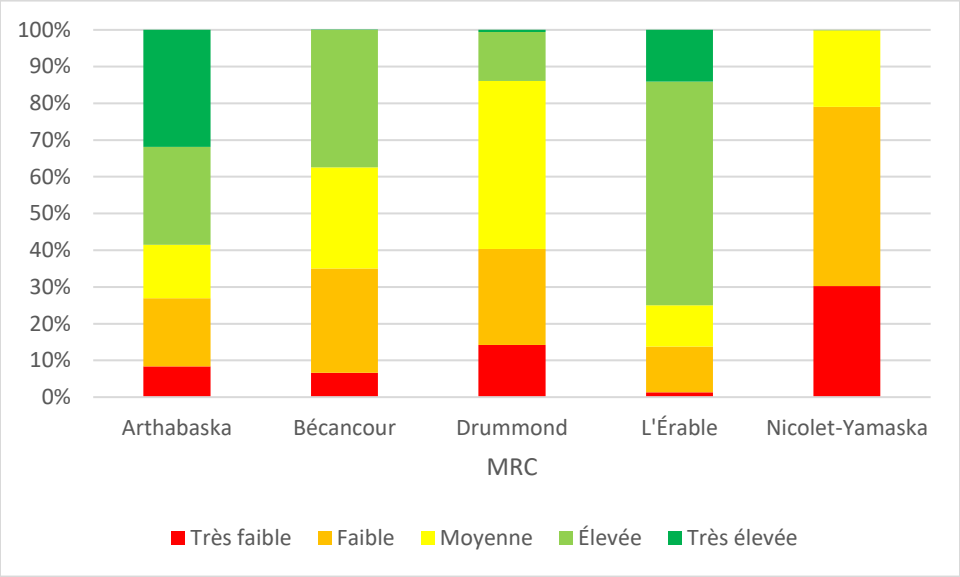
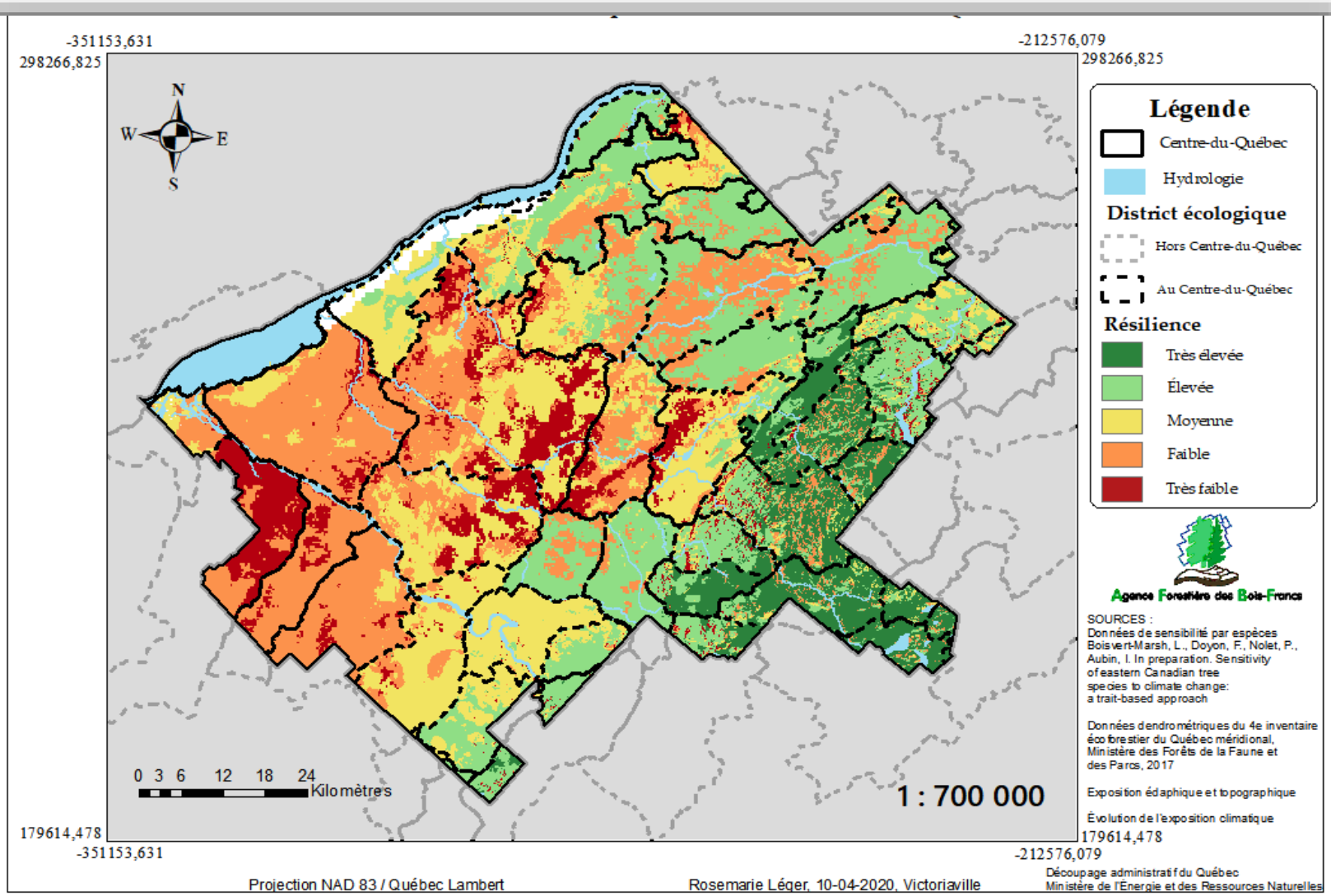


Figure 15 : Proportion relative des classes de résilience à la sécheresse des paysages forestiers de chacune des MRC du Centre-du-Québec.

Carte 9 : Résilience du paysage à la sécheresse d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario climatique RCP 8,5 du Centre-du-Québec.



6.2.3 LE RISQUE DE DÉCLIN PRÉMATURÉ DES PAYSAGES FORESTIERS

Le risque de déclin prématuré des paysages est une façon de décrire le phénomène de perte du couvert forestier avant terme par petit groupe d'arbre. La mortalité d'un arbre est rarement subite mais provoque toujours une perte de feuillage et donc le déclin renvoie au concept de dépérissement accéléré. Les arbres peuvent en général subir deux à trois années de défoliation continue de leur houppier lorsque leurs réserves sont suffisantes. Par contre, un arbre déjà affaibli par un autre facteur de stress est généralement moins résilient à se refaire un feuillage. L'information tirée de l'analyse du risque de déclin prématuré est essentielle pour prévoir la modification de la composition forestière du territoire.

Le risque de déclin a été calculé en considérant la vulnérabilité (carte 8) et la résilience (carte 9) des paysages. Considérée seule, la vulnérabilité ne nous indique pas si le paysage peut se remettre d'un stress de sécheresse. Ainsi en jumelant l'indice de la vulnérabilité à celui de la résilience, le risque de déclin prématuré devient un outil de planification complet. Le risque de déclin prématuré est aussi influencé par la fréquence et la récurrence des stress. Le scénario climatique RCP 8,5 à été choisi dans l'optique ou le pire des évènements pourrait arriver d'ici 2070. Ainsi, la MRC de Nicolet-Yamaska se démarque avec une superficie à risque élevé deux fois plus grand que ces voisines. De plus, cette MRC a une superficie avec un taux de risque faible pratiquement absente. Dans cette perspective, des actions concrètes pour rendre les paysages forestiers plus résistants au futur climat pourrait être envisagé. Il important de comprendre que les aires de forêt ayant un faible taux de risque de déclin représentent, sur le terrain, des noyaux de forêt peu soumis aux effets potentielles des futures sécheresses. Ils sont en quelque sorte des refuges climatiques naturels. Néanmoins, leur distribution n'est pas homogène. La création de nouvelles aires résistantes aux CC, dans les MRC ou le paysage est le plus à risque de déclin, pourraient être une avenue prometteuse pour obtenir davantage de ces refuges climatiques.

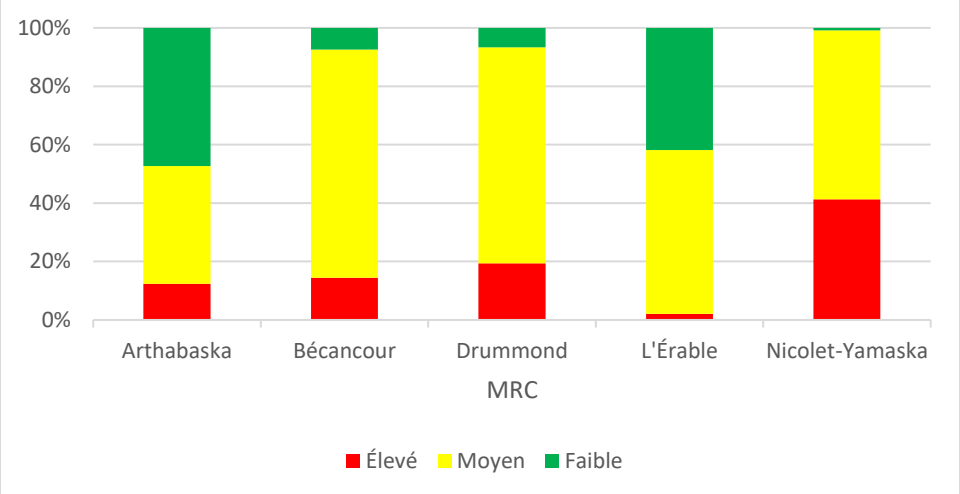
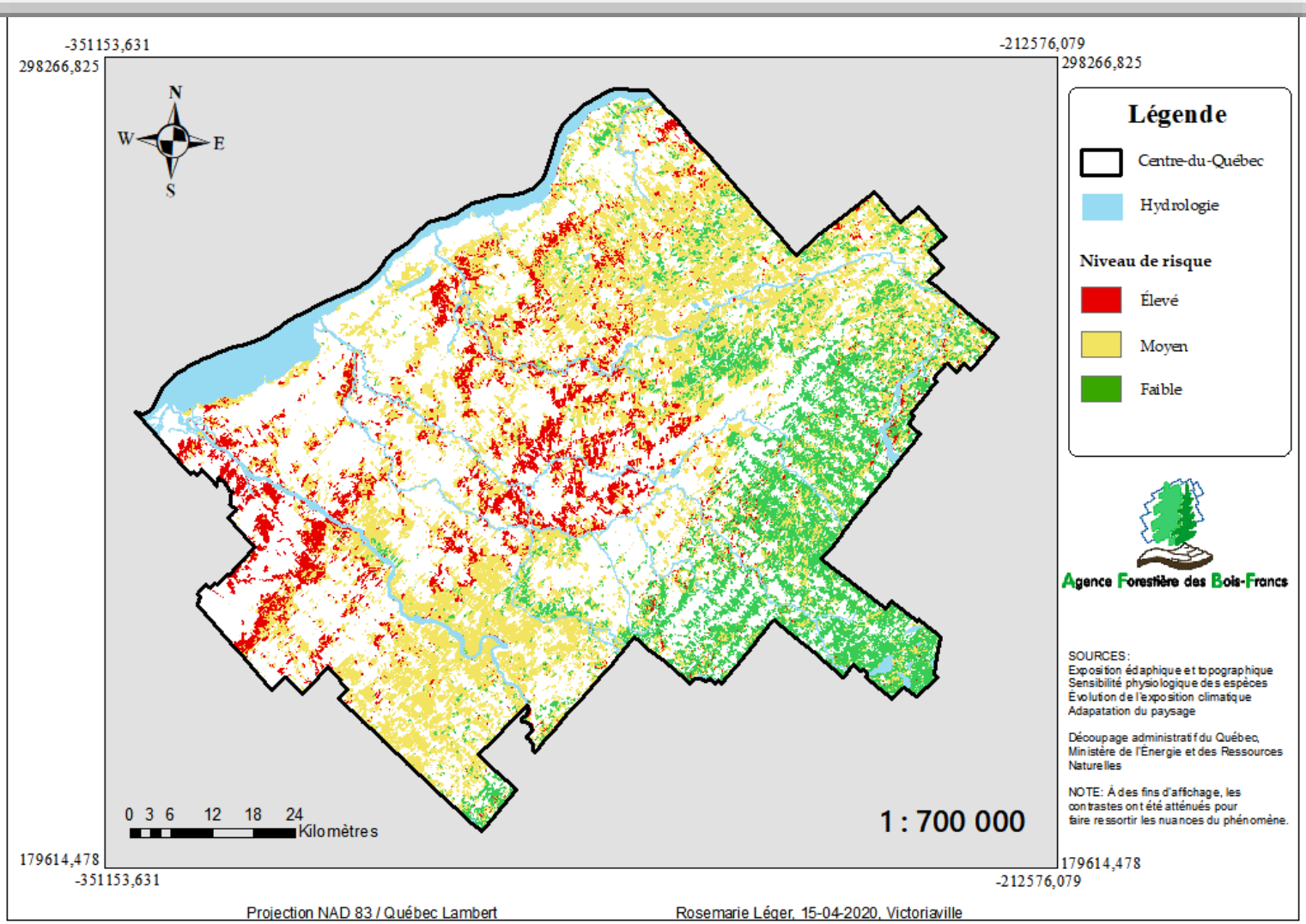


Figure 16 : Proportion relative des classes du risque de déclin prématuré du paysage forestier à la sécheresse de chacune des MRC du Centre-du-Québec.

Carte 10 : Risque de déclin prématuré des paysages forestier d'ici 20 à 50 ans (horizon 2041-2070) selon le scénario RCP 8,5.



7. DISCUSSION ET CONCLUSION DES ANALYSES

Les résultats de ce travail ne peuvent être comparés à d'autres étant donné que ce sont les premiers avancements à ce chapitre au sud du Québec et que l'échelle d'analyse est spécifique au Centre-du-Québec. Néanmoins, il est intéressant de constater que les résultats sont différents par MRC. À ce sujet, les paysages forestiers des MRC ayant du territoire au centre et à l'est de la région sembleraient plus à risque de déclin prématuré. Des réflexions plus urgentes devraient être entreprises pour préparer les nouvelles actions sylvicoles face à un futur incertain.

La simplicité a été fortement encouragée lors de la création des outils. Le but était de développer une méthodologie reproductible et applicable à d'autres territoires. Les résultats sont spatialement explicites et à cet effet il faut s'en servir uniquement comme une référence géomatique vers une planification forestière plus efficace dans un horizon à moyen terme. Plus précisément, pour poser un diagnostic détaillé du peuplement, des validations supplémentaires sur le terrain doivent être organisées. Celles-ci doivent porter sur la santé des cimes actuelles, la densité initiale des arbres sains, le régime hydrique réel, la granulométrie du sable, la composition et l'abondance des espèces intermédiaires et en régénération. L'approche proposée est adaptative et pourra faire l'objet de bonifications ultérieures avec les données du cinquième inventaire forestier du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs et les avancées scientifiques en termes de connaissance sur l'adaptation des espèces.

8. PLAN D'ACTION EN MATIÈRE D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE L'AGENCE FORESTIÈRE DES BOIS-FRANCS

Le plan d'action de l'AFBF en matière d'adaptation des stratégies sylvicoles face aux changements climatiques est une réunion de plusieurs valeurs issues du cadre stratégique du Plan de Protection et de Mise en Valeur (PPMV). Ces valeurs du PPMV sont les suivantes :

1. La conservation des milieux humides;
2. Le maintien et le rétablissement de la biodiversité;
3. La santé des forêts;
4. La mise en valeur des peuplements à dominance feuillue;
5. L'intensification de l'aménagement forestier;
6. La valorisation de l'aménagement forestier durable;
7. La création d'une culture forestière régionale.

Afin de structurer efficacement le plan d'action, celui-ci comprend une orientation spécifique et trois axes d'actions prioritaires. L'orientation spécifique joue le rôle de mât principal où s'accrochent les sept valeurs du PPMV. Ensuite, viennent les axes prioritaires d'action qui jouent le rôle d'accueillir ces valeurs à l'intérieur de trois thèmes liés directement à l'adaptation. À partir de cette structure, il est possible de formuler des objectifs d'adaptation, parfois comparables à ceux contenus dans le PPMV. Finalement, des actions sont énoncées afin de soutenir l'atteinte des objectifs fixés. Les objectifs à atteindre sont imputables à chacune de ces actions et devraient garantir une motivation optimale dans la progression de l'adaptation.

Orientation et Axes

Promouvoir des stratégies sylvicoles qui favorisent une composition et une structure diversifiée des peuplements forestiers, notamment en valorisant le rétablissement naturel ou artificiel des combinaisons d'espèces adaptées aux changements climatiques. Cela en tenant compte, dans la planification des activités d'aménagements forestiers, de l'importance des fonctions et services écologiques et de la compréhension de ceux-ci par la population.

Axe 1. Optimiser les transferts des compétences sur les changements climatiques par la communication et la formation

Valeur associée au PPMV :
Création d'une culture forestière régionale
Valorisation de l'aménagement forestier

Axe 2. Diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers par l'augmentation de la diversité

Valeurs associées au PPMV :
Conservation des milieux humides
Maintien et rétablissement de la biodiversité
Santé des forêts

Axe 3. Favoriser l'aménagement intensif des sites à haut rendement par l'analyse des risques

Valeurs associées au PPMV :
Mise en valeur des peuplements à dominance feuillue
Intensification de l'aménagement forestier

8.1 AXE 1 – FAVORISER LE TRANSFERT DE CONNAISSANCES ET DES COMPÉTENCES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES PAR LA COMMUNICATION ET LA FORMATION PROACTIVE

Figure 17 : Formation sur les milieux humides.

Pour l'agence, ce guide et ses retombées sont la continuité d'une communication axée sur les enjeux que représentent les changements climatiques. Les échanges entre les intervenants des milieux naturels vont pouvoir améliorer le transfert d'informations scientifiques pour permettre les processus d'apprentissage à travers l'action. Nous avons ciblé deux objectifs qui seront aidants pour favoriser le transfert des compétences. Les objectifs à atteindre et les actions proposées sont présentés au tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour favoriser le transfert de connaissances entre les intervenants du milieu naturel du centre-du-Québec.

Objectifs d'adaptation	Actions spécifiques	Priorité
Créer des outils didactiques	• Améliorer la qualité de la planification forestière • Enrichir le savoir actuel et le contenu des formations • Développer une expertise terrain	1
S'impliquer dans la communication de l'information	• Diffuser l'information pertinente et les outils disponibles • Faciliter les rapprochements entre les forestiers et les chercheurs • Favoriser un langage commun des phénomènes • Renforcir la cohésion des informations reconnues essentielles à l'adaptation • Encourager l'organisation de formations terrain essentielles à la compréhension commune des enjeux et des préoccupations	2

8.2 AXE 2 – DIMINUER LA VULNÉRABILITÉ DES PEUPLEMENTS FORESTIERS PAR UNE AUGMENTATION DE LA DIVERSITÉ

Figure 18 : Détection de la tordeuse des bougeons de l'épinette sur le terrain.

Les changements climatiques sont susceptibles d'entraîner une augmentation des épisodes de sécheresse dans le sud du Québec dans les prochaines décennies. Ainsi, la tolérance à la sécheresse des écosystèmes forestiers du Centre-du-Québec est un enjeu crucial pour le futur. Les peuplements forestiers du Centre-du-Québec les plus à risque de déclin prématuré ont été cartographiés grâce à la création de nouveaux outils géomatiques (section 5). Il est important de mettre de l'avant certaines actions préventives qui permettront de mitiger l'effet des épisodes de sécheresse sur les peuplements à risque et de maintenir la productivité des plus résilients. Nous avons ciblé huit objectifs d'adaptation qui seront aidants pour diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers. Les objectifs à atteindre et les actions proposées sont présentés au tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4 : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers du Centre-du-Québec.

Objectifs d'adaptation	Actions spécifiques	Priorité
Connaître la localisation des espèces végétales exotiques envahissantes	• Mesurer l'ampleur du phénomène d'envahissement • Soutenir la protection de la régénération des espèces désirées • Mettre en place des mesures d'atténuation	**3**
Connaître la propagation des insectes ravageurs et maladies des arbres	• Mesurer l'ampleur du phénomène d'envahissement • Informer les conseillers forestiers	**3**

Participer à la conservation et à la restauration des milieux humides forestiers	• Favoriser le développement de la biodiversité en place • Protéger les espèces à statut particulier • Soutenir les initiatives locales, régionales et provinciales	**2**
Valoriser les activités d'aménagement forestier des érablières rouges	• Améliorer la santé des peuplements vulnérables • Mettre en valeur son excellente capacité d'adaptation et son rendement en croissance naturellement rapide • Offrir des choix sylvicoles variés	**1**
Équilibrer les attributs structuraux des forêts	• Augmenter la séquestration du carbone • Augmenter la résistance et la résilience des peuplements forestiers	**1**
Augmenter la connectivité des peuplements	• Connaître l'état fragmentaire des forêts de la région • Mettre en place des mesures d'atténuation • Consolider la connectivité entre les peuplements forestiers pour favoriser la migration naturelle des semences	**2**
Valoriser la diversité d'espèces les mieux adaptées aux sécheresses	• Soutenir les activités d'aménagement forestier qui favorisent une biodiversité élevée et mieux adaptée	**1**
Intervenir sur le broutement du cerf de virginie	• Protéger la régénération des espèces ayant une adaptation naturelle • Limiter les pertes d'investissements de travaux sylvicoles • Initier la mise en place de mesures d'atténuation	**2**

8.3 AXE 3 – FAVORISER L'AMÉNAGEMENT INTENSIF DES SITES À HAUT RENDEMENT PAR L'ANALYSE ET LA GESTION DES RISQUES

Figure 19 : Plantation de résineux par bandes.

Afin de répondre à son mandat d'optimisation des investissements sylvicoles, l'Agence souhaite encourager la réalisation de travaux d'aménagement (reboisement, éclaircies, etc.) dans des sites hautement productifs. Ce sont les sites où la production de matière ligneuse est maximisée, où le retour sur l'investissement est le plus rapide et le moins risqué. Cela étant fait dans le but de diminuer la pression de travaux sylvicoles sur des peuplements de vulnérabilité élevée. Un exercice de priorisation des sites à fort potentiel a été effectué par l'Agence en 2012 et sera revu en fonction de la nouvelle analyse des risques de ce projet. Nous avons ciblé trois objectifs d'adaptation qui seront aidants pour diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers. Les objectifs à atteindre et les actions proposées sont présentés au tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Description des objectifs d'adaptation et des actions par priorité pour augmenter le rendement des peuplements forestiers les plus productifs et les moins à risque face aux sécheresses futures au Centre-du-Québec. CDQ.

Objectifs d'adaptation	Actions spécifiques	Ordre de priorité
Favoriser une séquence soutenue de traitements	• Maximiser les rendements ligneux tout en libérant la pression sur les milieux plus vulnérables • Optimiser les investissements sylvicoles	3
Protéger la régénération	• Minimiser les effets négatifs grandissant du broutage du cerf de Virginie • Protéger les investissements sylvicoles des stress biotiques et climatiques anticipés	1
Favoriser les plantations d'espèces diversifiées	• S'impliquer dans une stratégie de reboisement régionale en espèces bien adaptées aux sécheresses • Orienter les conseillers forestiers vers les sites de reboisement ayant le moins de risques de mortalité par la sécheresse	2

9. CONCLUSION GÉNÉRALE

La foresterie et les autres activités liées aux forêts contribuent au développement socio-économique des communautés locales comme celles du Centre-du-Québec. Ces activités sont susceptibles d'être affectées par les changements climatiques pouvant induire une modification des fonctions écologiques et compromettre certains services écologiques rendus par les forêts. Toutefois, si des stratégies d'adaptation sont mises en place, ces changements pourront aussi offrir des opportunités dont les communautés pourraient tirer profit. C'est en entreprenant des démarches et des actions à l'échelle locale que nous pourrons augmenter nos connaissances et atténuer les effets négatifs que pourraient avoir les changements climatiques autant d'un point de vue économique qu'environnemental et social. En effet, l'aménagement forestier, et plus particulièrement la sylviculture, peut aider à rendre les forêts moins vulnérables en incluant des objectifs d'adaptation qui réduisent les impacts négatifs et favorisent les plus positifs. Le but d'une sylviculture d'adaptation dans une perspective de climat incertain est de rendre les peuplements forestiers plus résistants ou encore résilients ou même de les faire transiter vers une nouvelle composition plus adaptée à l'arrivée de nouveaux insectes ravageurs, d'agents pathogènes et de plantes envahissantes. Des traitements sylvicoles qui augmentent la diversité locale, favorisent l'implantation d'espèces plus tolérantes à la sécheresse, ajustent la densité du peuplement en fonction des stress hydriques et permettent une meilleure connectivité faunique et végétale seraient à privilégier afin d'assurer la pérennité du couvert forestier centricois.

Le plan d'action en matière d'adaptation aux changements climatiques présente des défis importants que nous pourrons relever ensemble. En effet, face à ce contexte climatique changeant, nos écosystèmes forestiers pourraient devenir moins productifs si nous n'agissons pas sur l'adaptation des scénarios sylvicoles. De ce fait, les actions identifiées par l'Agence des Bois-Francs permettront de soutenir une communication riche en information et, ensemble, d'améliorer la résistance, la résilience ou la transition des peuplements forestiers plus à risque de dégradation de leur condition écologique face aux changements climatiques. Finalement, elles permettront de cibler des secteurs à haut rendement et de bonifier le rendement de ces sites par une diversité d'espèces clés.

Avec le soutien des Programmes d'aide à la mise en valeur des forêts privées, l'Agence pourra assurer l'accomplissement de plusieurs actions énumérées dans le plan d'action. Toutefois, pour un résultat optimal, la réalisation de l'ensemble des actions devra être menée en collaboration avec plusieurs partenaires locaux. Ainsi, tout au long du déploiement du plan d'action en matière d'adaptation aux changements climatiques, l'Agence s'assurera que les moyens déployés soit tangibles aussi sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

Adams H.D., et al. 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. Los Alamos National Laboratory LA-UR-17-25679. Nature Écology and Evolution. Doi10.1038/s41559-017-0248-x

Annecou C, B. Boulet, E. Thiffault, A. Munson. En préparation. Response of the deciduous forest of southeast Canada to the severe drought of 2012.

Agence forestière des Bois-Francs (AFBF) 2014, *Plan de protection et de mise en valeur des forêts privées (PPMV) du Centre-du-Québec, Tome 1 – Portrait du territoire*, 157 p.

Agence forestière des Bois-Francs (AFBF) 2014. *Plan de protection et de mise en valeur des forêts privées (PPMV) du Centre-du-Québec, Tome 2 – Portrait forestier*, 84 p.

Allen C. D., D. D. Breshears, and N. G. McDowell. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere 6(8):129. Doi.org/10.1890/ ES15-00203.1

Allen C. D., et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. For. Ecol. Manage. 259(4), 660-684. Doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001

Anderegg William RL, Jeffrey M. Kane, and Leander DL Anderegg. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. Nature climate change 3.1 (2013): 30-36.

Aubin, I., Boisvert-Marsh, L., Kebli, H., McKenney, D., Pedlar, J., Lawrence, K., Hogg, E. H., Boulanger, Y., Gauthier, S., and Ste-Marie, C. 2018. Tree vulnerability to climate change: improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. Ecosphere 9(2):e02108. 10.1002/ecs2.2108

Aubin, I., A. Munson, F. Cardou, P. J. Burton, N. Isabel, J. H. Pedlar, A. Paquette, A. R. Taylor, S. Delagrange, H. Kebli, C. Messier, B. Shipley, F. Valladares, J. Kattge, L. Boisvert-Marsh, and D. McKenney. 2016. Traits to stay, traits to move: a review of functional traits to assess sensitivity and adaptive capacity of temperate and boreal trees to climate change. Environmental Reviews **24**: 164-186.

Bush, E. et Lemmen, 2019. Rapport sur le climat changeant du Canada, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 446 p. https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr

Brice, M-H, Cazelles, K, Legendre, P, Fortin, M-J. Disturbances amplify tree community responses to climate change in the temperate–boreal ecotone. Global Ecol Biogeogr. 2019; 28: 1668– 1681. Doi.org/10.1111/geb.12971

Beauchesne, P., V. Gérardin, J.P. Ducruc et BellavanceD., 1998. Cadre écologique de référence de l'Agence forestière des Bois-Francs: caractérisation des grands écosystèmes pour le plan de protection et de mise en valeur des forêts privées. Ministère de l'Environnement et de la faune et Agence forestière des Bois-Francs. 122 p.

Boisvert-Marsh, L. and de Blois, S. Minor revisions. Unravelling potential northward migration pathways for tree species under climate change. Journal of Biogeography

Boisvert-Marsh, L., S. Royer-Tardif, F. Doyon, P. Nolet, and I. Aubin. 2020. Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in Eastern Canada and inform adaptation practices. Forests 11: 989.

Boisvert-Marsh, L., C. Périé, S. de Blois. 2014. Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. Ecosphere 5(7):83. Doi.org/10.1890/ES14-00111.1

Bouchard, Mathieu, et al. 2019. Tree species persistence under warming conditions: A key driver of forest response to climate change. Forest ecology and management 442 (2019): 96-104.

Breshears D.D., Orrin B. Myers, Clifton W. Meyer, Fairley J. Barnes, Chris B. Zou , Craig D. Allen , Nathan G. McDowell, and William T. Pockman.2009. Tree die-off in response to global change-type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. Front Ecol Environ 2009; 7(4): 185–189, Doi:10.1890/080016

Brice, M-H, Vissault, S, Vieira, W, Gravel, D, Legendre, P, Fortin, M-J. 2020. Moderate disturbances accelerate forest transition dynamics under climate change in the temperate–boreal ecotone of eastern North America. Glob Change Biol. 2020; 26: 4418– 4435.

Doi.org/10.1111/gcb.15143

Brown, Carissa D., and M. Vellend. 2014. Non-climatic constraints on upper elevational plant range expansion under climate change. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 281.1794 (2014): 20141779.

Collin, A., C. Messier, and N. Bélanger. 2017. Conifer Presence May Negatively Affect Sugar Maples Ability to Migrate into the Boreal Forest Through Reduced Foliar Nutritional Status. Ecosystems **20**:701-716

Clark, James S., et al. 2016. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. Global change biology 22.7 (2016): 2329-2352.

Gewehr S., I. Drobyshev, F. Berninger, Y. Bergeron. 2014. Soil characteristics mediate the distribution and response of boreal trees to climatic variability. Canadian Journal of Forest Research, 2014, Vol. 44, Nº 5 : pages 487-498. Doi.org/10.1139/cjfr-2013-0481

DesJarlais C.,, M. Allard, A. Blondlot, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve 2015. Savoir s'adapter aux changements climatiques, Ouranos, Montréal, 2010, 128 p.

D'Orangeville L., Justin Maxwell, Daniel Kneeshaw, Neil Pederson, Louis Duchesne, Travis Logan, Daniel Houle, Dominique Arseneault, Colin M. Beier, Daniel A. Bishop, Daniel Druckenbrod, Shawn Fraver, François Girard, Joshua Halman, Chris Hansen, Justin L. Hart, Henrik Hartmann, Margot Kaye, David Leblanc, Stefano Manzoni, Rock Ouimet, Shelly Rayback, Christine R. Rollinson, Richard P. Phillips, 2018. Drought timing and local climate determine the sensitivity of eastern temperate forests to drought. Doi.org/10.1111/gcb.14096

Doyon, F., Bouffard, D. 2009. *Enjeux écologiques de la forêt feuillue tempérée québécoise.* Technical report, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

Glick, Patricia, Bruce A. Stein, and Naomi A. Edelson. 2011. *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment.* National Wildlife Federation, Washington, D.C. https://reefresilience.org/wp-content/uploads/Glick-et-al.-2011-Scanning-the-Conservation-Horizon.pdf

Gouvernment du Québec www.foretouverte.gouv.qc.ca. Consulté en février 2020.

Henry, H.A.L., Abedi, M., Alados, C.L. et al. 2018. Increased Soil Frost Versus Summer Drought as Drivers of Plant Biomass Responses to Reduced Precipitation: Results from a Globally Coordinated Field Experiment. Ecosystems 21, 1432–1444 (2018). Doi.org/10.1007/s10021-018-0231-7

Henry, H. A. L. 2008. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes. Climatic Change **87**:421-434.

Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T., Harvey, R. 2012. Projections of future soil temperature and water content for three Southern Quebec forested sites. Journal of Climate, 25(21):7690-7701.

Huang X., Johanna Schmitt, Lisa Dorn, Converse Griffith, Sigi Effgen, Shaun Takao, Maarten Koornneef, Kathleen Donohue. 2010. The earliest stages of adaptation in an experimental plant population: strong selection on QTLS for seed dormancy. Molecular Ecology, Volume19, Issue7, April 2010, Pages 1335-1351. Doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04557.x

Jeffrey S. Dukes, Jennifer Pontius, David Orwig, Jeffrey R. Garnas, Vikki L. Rodgers, Nicholas Brazee, Barry Cooke, Kathleen A. Theoharides, Erik E. Stange, Robin Harrington, Joan Ehrenfeld, Jessica Gurevitch, Manuel Lerdau, Kristina Stinson, Robert Wick, Matthew Ayres. 2009. Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? Revue canadienne de recherche forestière, 2009, 39(2): 231-248. Doi.org/10.1139/X08-171

Lafleur, Benoit, et al. 2010. Response of northeastern North American forests to climate change: Will soil conditions constrain tree species migration? Environmental Reviews 18.NA (2010): 279-289.

Lajoie, G., Houle, D. et A. Blondlot. 2016. *Impacts de la sécheresse sur le secteur forestier québécois dans un climat variable et en évolution.* Montréal, Québec : Ouranos, 13 p.

Logan, T., I Charron, D. Chaumont, D. Houle. 2011. *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Ouranos et MRNF. 55 p.

Logan 2017. *Production d'un portrait des changements climatiques pour les zones urbaines du Québec*. Symposium Ouranos 2017 : Session 5a. Ouranos.

Lupi C., Morin H., Deslauriers A., Rossi S. 2010. Xylem phenology and wood production: resolving the chicken-or-egg dilemma. Plant Cell and Environment 33: 1721-1730

McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., Owen, T. 2011. Customized spatial climate models for North America. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(12), 1611-1622.

McKenney, D., J. Pedlar, M. Hutchinson, P. Papadopol, K. Lawrence, K. Campbell, E. Milewska, R. F. Hopkinson, and D. Price. 2013. Spatial climate models for Canada's forestry community. The Forestry Chronicle 89:659–663.

Ministry of Agriculture of British Colombia. 2015. Water Conservation Factsheet no 619.000-1

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs : Carrefour de la recherche forestière (CRF) 2019, Centre des Congrès, Québec.

Ouranos 2015. *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114p.

Ouranos : https://www.ouranos.ca/portraits-climatiques/#/. Consulté en décembre 2020.

Parry O.F. Canziani J.P. Palutikof P.J. van der Linden and C.E. Hanson. 2007. Impacts Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change M.L. Cambridge University Press Cambridge. Eds. Climate Change 2007 : Ecosystems their properties goods and services.

Périé C., S. de Blois, MC Lambert, N Casajus. 2014. Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec. Gouvernement du Québec, minitère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière nº173. 46 p.

Rapport sur le climat changeant du Canada (CCCR) 2019. https://changingclimate.ca/CCCR2019/definitions/. Site web consulté en novembre 2020.

Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., Fischer G., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafaj P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Climate Change. Doi: 10.1007/s10584-011-0149-y

Solarik, K. A., K. Cazelles, C. Messier, Y. Bergeron, and D. Gravel. 2020. Priority effects will impede range shifts of temperate tree species into the boreal forest. Journal of Ecology **108**:1155-1173.

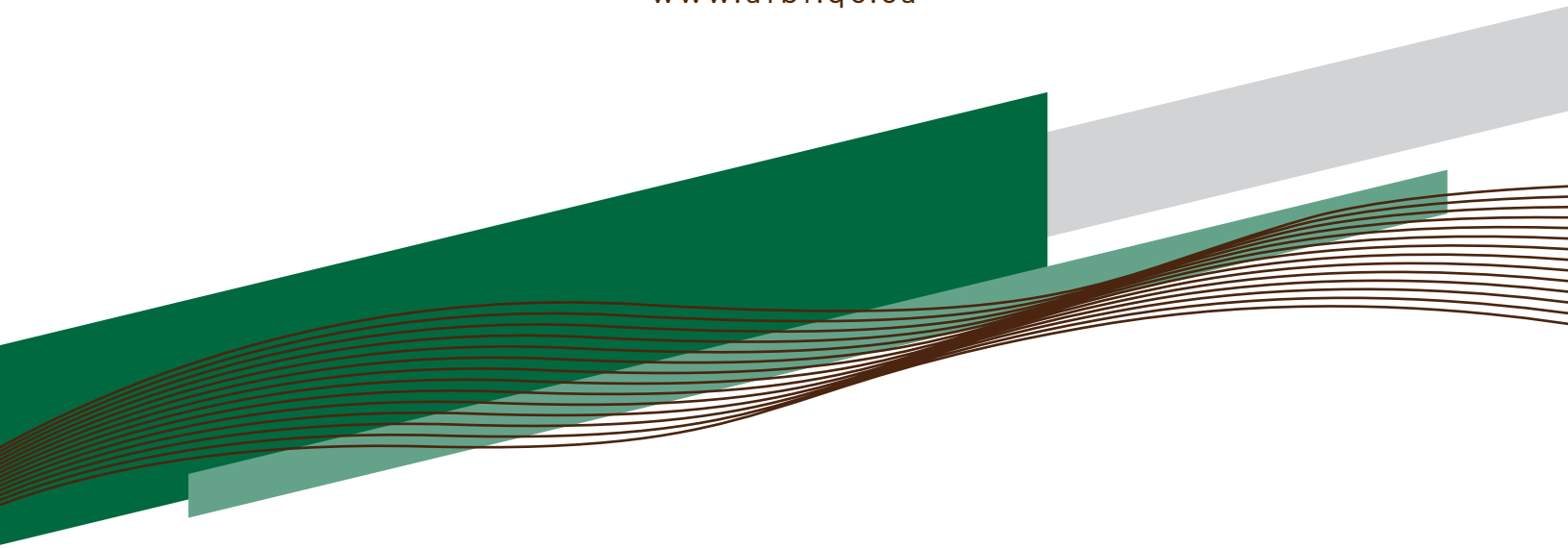
Sorensen R., Zinko U., Seibert J. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. Hydrology and Earth System Sciences 10, 101-112.

Stage A. R., C. Salas. 2007. Interactions of Elevation, Aspect, and Slope in Models of Forest Species Composition and Productivity. Forest Science 53(4)

Stern R.L., Paul G. Schaberg, Shelly A. Rayback, Paula F. Murakami, Christopher F. Hansen, and Gary J. Hawley.2020. Growth of canopy red oak near its northern range limit: current trends, potential drivers, and implications for the future. Canadian Journal of Forest Research**.** 20 April 2020**.** Doi.org/10.1139/cjfr-2019-0200

Sylvain J.-D., Anctil F., Thiffault E. Under review. Using bias correction and ensemble modelling for predictive mapping and related uncertainty: a case study in digital soil mapping.

Trenberth, K. E., A. Dai, G. van der Schrier, P. D. Jones, J. Barichivich, K. R. Briffa, and J. Sheffield. 2014. Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4, 17-22. Doi:10.1038/NCLIMATE2067.

Agence Forestière des Bois-Francs

www.afbf.qc.ca