

# Guide pour l'adaptation des forêts montérégiennes aux changements climatiques





**Le projet de guide a été rendu possible grâce à l'appui financier obtenu dans le cadre d'une entente sectorielle conclue au sein de la région administrative de la Montérégie en vue de soutenir le secteur forestier.** Cette entente regroupe la Table de concertation régionale de la Montérégie, les 14 municipalités régionales de comté (MRC), l'agglomération de Longueuil, l'Agence forestière de la Montérégie, le ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (MFFP), le ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

Québec 

## Équipe de réalisation

### **Recherche et rédaction :**

Marianne Cusson, biologiste et Steve Breton, tech.for., avec l'aide de Jean-Francois Pépin, tech.for., *Agence forestière de la Montérégie*.

### **Supervision / révision :**

Claudine Lajeunesse, ing.f., *Agence forestière de la Montérégie*.

### **Cartographie :**

Jean-François Pépin, tech.for., *Agence forestière de la Montérégie*.

### **Mise en page / graphisme :**

Martin Breton, graphiste, *Effet M inc.*

## Citation suggérée

Agence forestière de la Montérégie. 2022. *Guide pour l'adaptation des forêts montérégiennes aux changements climatiques*. 52 p.

## Remerciements

L'équipe de l'Agence forestière de la Montérégie tient à remercier tous ses partenaires et collaborateurs pour leur précieuse contribution dans le cadre de la réalisation de ce guide, et en particulier :

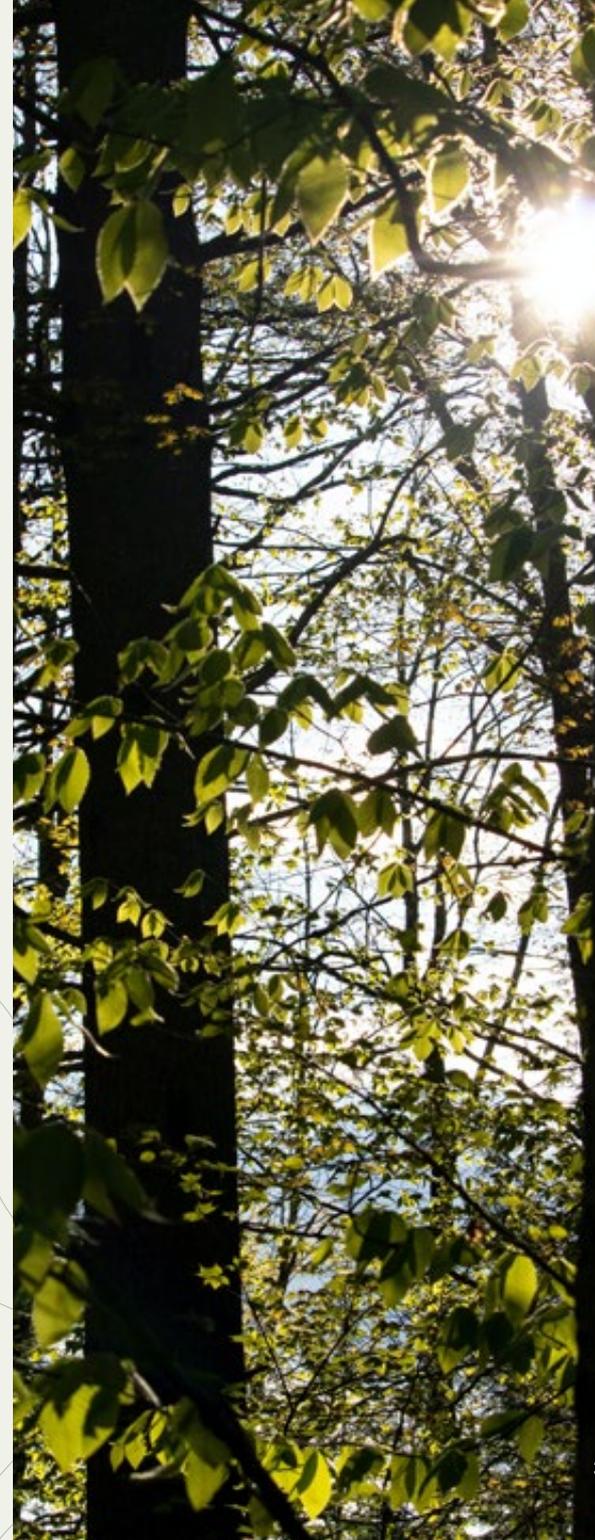
Carine Anneou ing.f., *Conseil régional de l'environnement du Centre-du-Québec*.

Isabelle Aubin Ph.D., biologiste des écosystèmes forestiers, Service canadien des forêts, *Ressources naturelles Canada*.

Laura Boisvert-Marsh Ph.D., biologiste des écosystèmes forestiers, Service canadien des forêts, *Ressources naturelles Canada*.

Frédéric Doyon PhD., professeur en écologie appliquée à l'écologie du paysage et l'aménagement forestier, *Université du Québec en Outaouais*.

Alain Paquette Ph.D., professeur au département des Sciences Biologiques, *Université du Québec à Montréal*.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>Changements climatiques attendus et impacts potentiels sur les forêts</b>	<b>6</b>
Augmentation des températures	6
Événements climatiques extrêmes	7
Cycle de l'eau	7
Précipitations et cycle de l'eau	8
Sécheresse	9
L'embolie	11
Le stress hydrique	13
Enjeux climatiques saisonniers	14
Hiver 2050, en Montérégie	14
Printemps 2050, en Montérégie	16
Été 2050, en Montérégie	17
Automne 2050, en Montérégie	18
Changements de composition des communautés forestières	19
Impacts attendus sur quelques types de forêts	20
Impacts attendus dans les forêts feuillues mésiques	20
Impacts attendus dans les forêts feuillues humides	22
Impacts attendus dans les forêts résineuses et mixtes de basse altitude	23
Dommages causés par des espèces exotiques envahissantes	24
Plantes exotiques envahissantes	24
Insectes ravageurs	24
<b>Adapter sa forêt aux changements climatiques</b>	<b>25</b>
Intégrer les changements climatiques aux décisions d'aménagement forestier - Démarche proposée	25
Étape 1 : Identifier le peuplement visé et ses caractéristiques	25
Étape 2 : Évaluer le niveau de risque du peuplement	26
Étape 3 : Évaluer la capacité d'adaptation du peuplement et la liste des enjeux	28
Étape 4 : Déterminer l'approche à adopter	30
Étape 5 : Identifier les objectifs d'aménagement et les moyens à adopter	32
<b>Conclusion</b>	<b>36</b>
<b>Glossaire</b>	<b>37</b>
<b>Références</b>	<b>38</b>
<b>Liste des annexes</b>	<b>39</b>
<b>Annexes</b>	<b>40</b>

# Introduction

La forêt de la Montérégie, comme les forêts d'ailleurs, subit les impacts des changements climatiques. Canicules, variations des températures saisonnières et événements climatiques extrêmes font partie des manifestations de ces changements. Nos forêts bénéficient d'une certaine résistance à ces stress, mais les changements attendus se matérialiseront en un temps très court, sans commune mesure avec l'échelle de temps nécessaire à l'adaptation des espèces.

Comment peut-on aider les boisés à devenir mieux adaptés aux conditions qui s'annoncent?

Adapter nos forêts ne sera pas une tâche facile, mais la sylviculture constitue sans aucun doute l'outil de prédilection pour diriger cette adaptation.

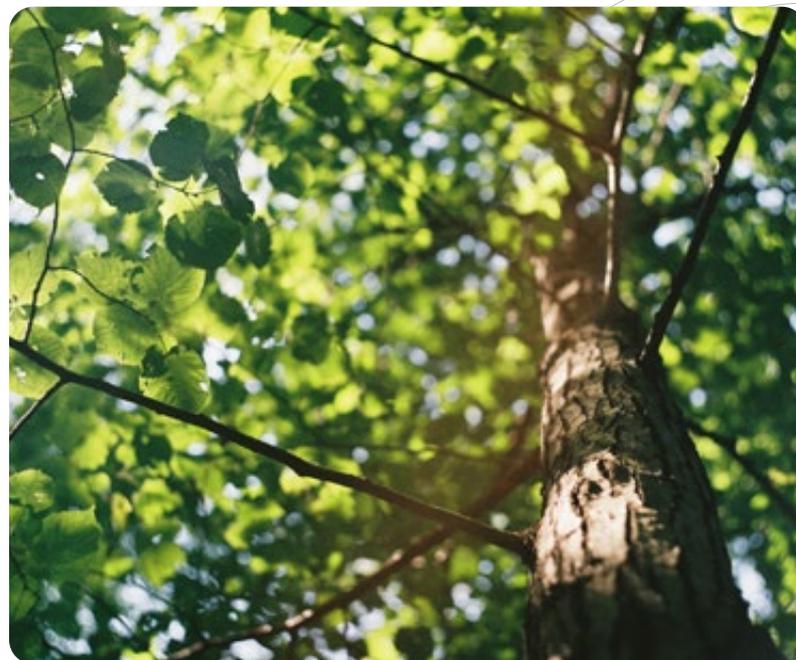
Sans prétendre solutionner l'ensemble des problèmes que rencontreront les forestiers en lien avec les changements climatiques, ce guide tente de faire connaître les manifestations attendues en Montérégie et leurs effets potentiels sur les forêts et la sylviculture. Il tente également de proposer une démarche pour intégrer ces nouvelles considérations aux décisions d'aménagement forestier, notamment en proposant des éléments à prendre en compte pour évaluer le niveau de risque et la capacité d'adaptation des peuplements.

Cette connaissance des vulnérabilités d'un peuplement peut certainement orienter le choix des essences à y favoriser vers celles pressenties comme les plus résistantes aux stress attendus. La complexité de la problématique rend difficile de prédire quelle menace frappera le plus fort un boisé donné. Pour faire face à la vaste incertitude entourant les impacts des changements climatiques, la littérature scientifique nous suggère de rester humbles et de miser sur le retour ou le maintien de la diversité des forêts

afin qu'elles profitent du large éventail des capacités d'adaptation développées par les espèces d'arbres qui les composent.

Ce guide s'adresse d'abord aux conseillers forestiers, mais aussi aux propriétaires forestiers impliqués activement dans les stratégies sylvicoles touchant leurs boisés. Il se veut un outil d'aide à la décision pour orienter les choix des travaux sylvicoles afin de maximiser les chances de maintenir la santé de nos écosystèmes forestiers à court, moyen et long terme.

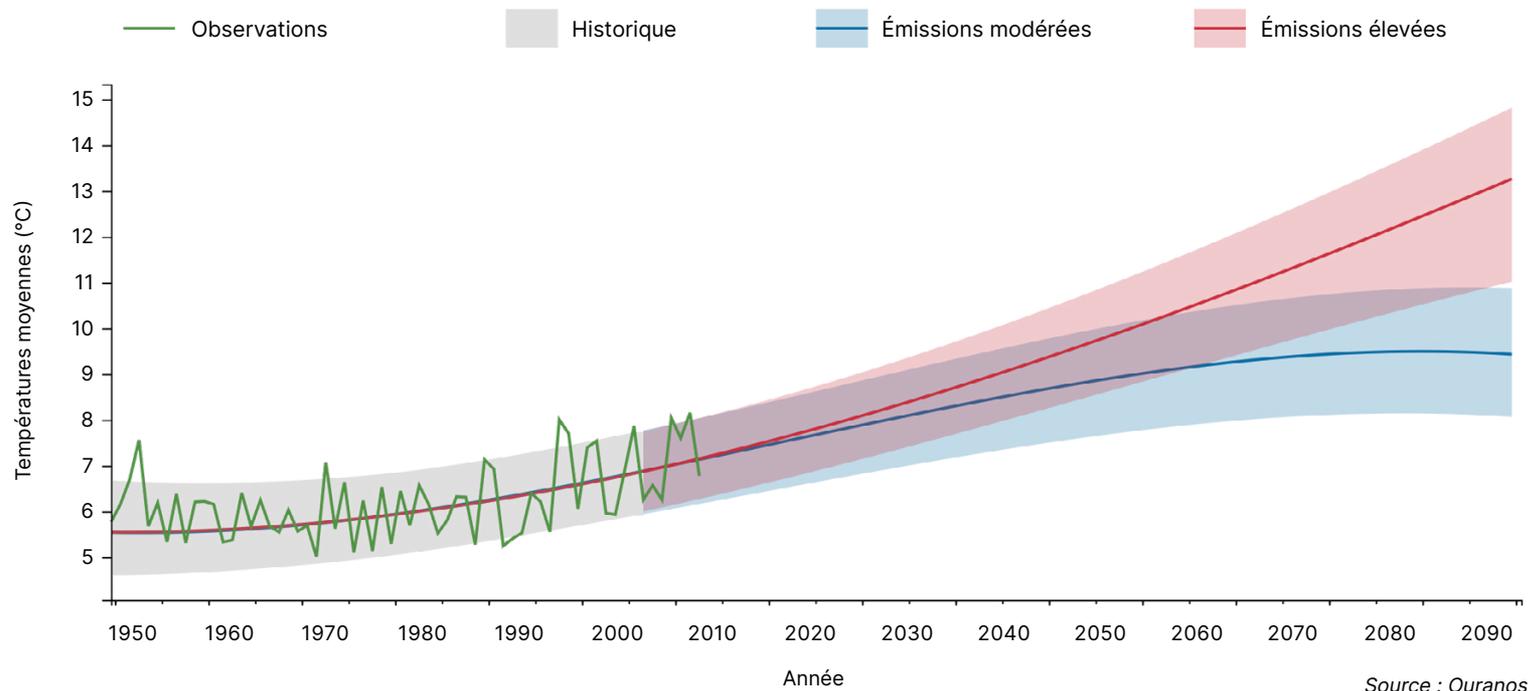
Par des choix avisés d'aménagements sylvicoles et les ajustements qu'ils apporteront à leurs approches, les conseillers forestiers joueront un rôle clé pour assurer la pérennité des forêts feuillues du sud du Québec.



# Changements climatiques attendus et impacts potentiels sur les forêts

## Augmentation des températures

Bien qu'une incertitude persiste sur l'intensité et les effets combinés qu'auront différents facteurs climatiques, l'augmentation des températures annuelles moyennes ne fait plus aucun doute. Celles attendues en Montérégie suivraient les tendances illustrées dans le graphique suivant.



**Figure 1. Prédictions de l'augmentation des températures moyennes en Montérégie.**

**En bleu :** scénario basé sur la prémisses du maintien de nos émissions de gaz à effets de serre à un niveau modéré, au cours des prochaines décennies.

**En rouge :** scénario basé sur celle d'un niveau d'émissions élevé.

# Événements climatiques extrêmes

En règle générale, les changements climatiques entraîneront une augmentation de la fréquence et de l'intensité de plusieurs types de manifestations climatiques extrêmes, dont les suivants :

- ⚠ **Pluies torrentielles et inondations**
- ⚠ **Redoux hivernaux**
- ⚠ **Épisodes de gel et de dégel**
- ⚠ **Canicules**
- ⚠ **Printemps ou automnes hâtifs ou tardifs**
- ⚠ **Vents violents**
- ⚠ **Verglas**



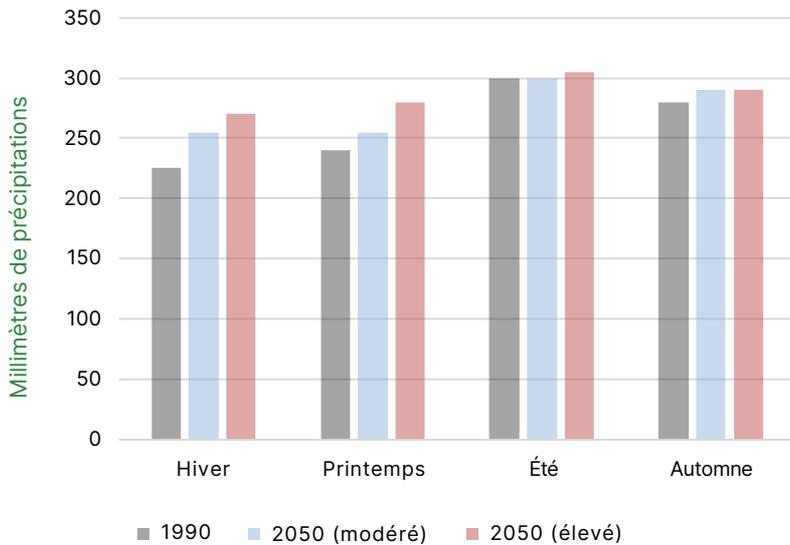
## Cycle de l'eau

Les températures plus chaudes, le gel moins profond des lacs, la fonte précoce et rapide des neiges, l'augmentation des pluies printanières et la tendance aux pluies torrentielles causeraient de profonds changements dans le cycle de l'eau, dont :

- 💧 **Diminution de l'infiltration de l'eau dans le sol**
- 💧 **Augmentation du ruissellement**
- 💧 **Crues printanières plus hâtives et beaucoup plus fortes**
- 💧 **Augmentation de l'érosion des rives et des sols**
- 💧 **Augmentation de l'apport de sédiments dans les cours d'eau et lacs**
- 💧 **Inondations**
- 💧 **Étiages d'été plus importants, plus fréquents et plus longs**

# Précipitations

**Les changements climatiques entraîneront au Québec une augmentation des quantités annuelles de précipitations.** Bien que beaucoup plus marquée dans le nord de la province, l'augmentation s'observerait même en Montérégie où elle atteindrait 4 à 9 % autour de l'année 2050, par rapport à la période de référence (1990). C'est cependant les changements saisonniers de précipitations qui se révèlent les plus intéressants.



**Figure 2. Quantités moyennes de précipitations saisonnières historique (1990 - en gris) et celles attendues vers 2050 selon deux scénarios de niveaux d'émissions (modéré, en bleu, et élevé, en rose).**



L'augmentation des précipitations serait plus marquée en hiver (13 à 18%), mais prendrait largement la forme de pluie, contrairement à nos habitudes. Puisque les chutes de neige seraient à la baisse en plus, la neige composerait vers 2050 à peine plus de la moitié des précipitations hivernales, alors qu'elle en constituait les deux tiers autour de 1990.

Les précipitations régionales printanières augmenteraient elles aussi, mais moins sensiblement que l'hiver (6 à 17%). Quant aux précipitations d'été et d'automne, les modèles climatiques ne sont pas unanimes à leur sujet : elles pourraient augmenter très légèrement ou rester semblables.

La tendance des pluies, se concentrant en épisodes moins nombreux mais beaucoup plus forts, s'intensifierait encore. Cette caractéristique risque de contribuer sensiblement aux impacts des changements climatiques sur les forêts de la région.

# Sécheresse



Au Québec, on prédit une augmentation de la quantité annuelle de précipitations. Elle se matérialisera cependant surtout l'hiver, alors que pour l'été, on s'attend plutôt au statu quo des quantités de précipitations.

## Sécheresse

Déficit de précipitation sur une période prolongée, habituellement une saison ou davantage, qui entraîne une pénurie d'eau ayant des effets néfastes sur la flore, la faune et la population.



**Maintien des quantités de précipitations estivales**



**Augmentation des températures estivales**

(et évapotranspiration)



**Moins d'infiltration de l'eau dans le sol**

(pluies diluviennes favorisant ruissèlement)



**Baisse du contenu en eau des sols durant l'été**

Ce statu quo, jumelé à une infiltration réduite de l'eau dans le sol (à cause de la forme torrentielle des pluies favorisant plutôt le ruissèlement de l'eau) et à l'augmentation des températures et de la durée de la saison de croissance, risque de réduire le contenu en eau des sols durant l'été, notamment en milieu forestier. Les forêts feraient donc face à un risque accru de sécheresse estivale.

## SÉCHERESSE

L'**indice d'humidité climatique** (IHC) donne une idée du niveau d'humidité des sols végétalisés. Il exprime la différence entre la quantité d'eau issue des précipitations annuelles et la perte potentielle d'eau par l'évapotranspiration. Une valeur positive de l'indice révèle des conditions humides avec des précipitations suffisantes au maintien d'une forêt à couvert fermé<sup>1</sup>. À l'opposé, un IHC négatif révélerait des sols secs qui pourraient, au mieux, soutenir des forêts discontinues. Les valeurs régionales de l'indice sont illustrées aux cartes de la **Figure 3**.



**Figure 3. Valeurs moyennes annuelles d'indice d'humidité climatique (IHC) pour la période de référence** (à gauche), **celles attendues vers 2050** (au milieu) **et vers 2080** (à droite). L'IHC exprime la différence entre les précipitations annuelles et la perte potentielle d'eau par l'évapotranspiration dans les sols végétalisés.

■ 5 ■ 25 ■ 45 ■ 65 ■ 85

La valeur la plus basse illustrée sur ces cartes, soit un IHC de 5, révélerait que le niveau d'humidité des sols de secteurs du sud-ouest de la Montérégie, autour de 2080, suffirait à peine à soutenir le maintien de forêts continues.

Notons que la situation s'annonce, à ce niveau, bien moins critique au Québec que dans plusieurs provinces et pays. Néanmoins, **l'approvisionnement insuffisant en eau des sols forestiers pourrait bien constituer l'enjeu le plus important lié aux changements climatiques que subiront les forêts du Québec<sup>2</sup>.**



<sup>1</sup> Ressources naturelles Canada

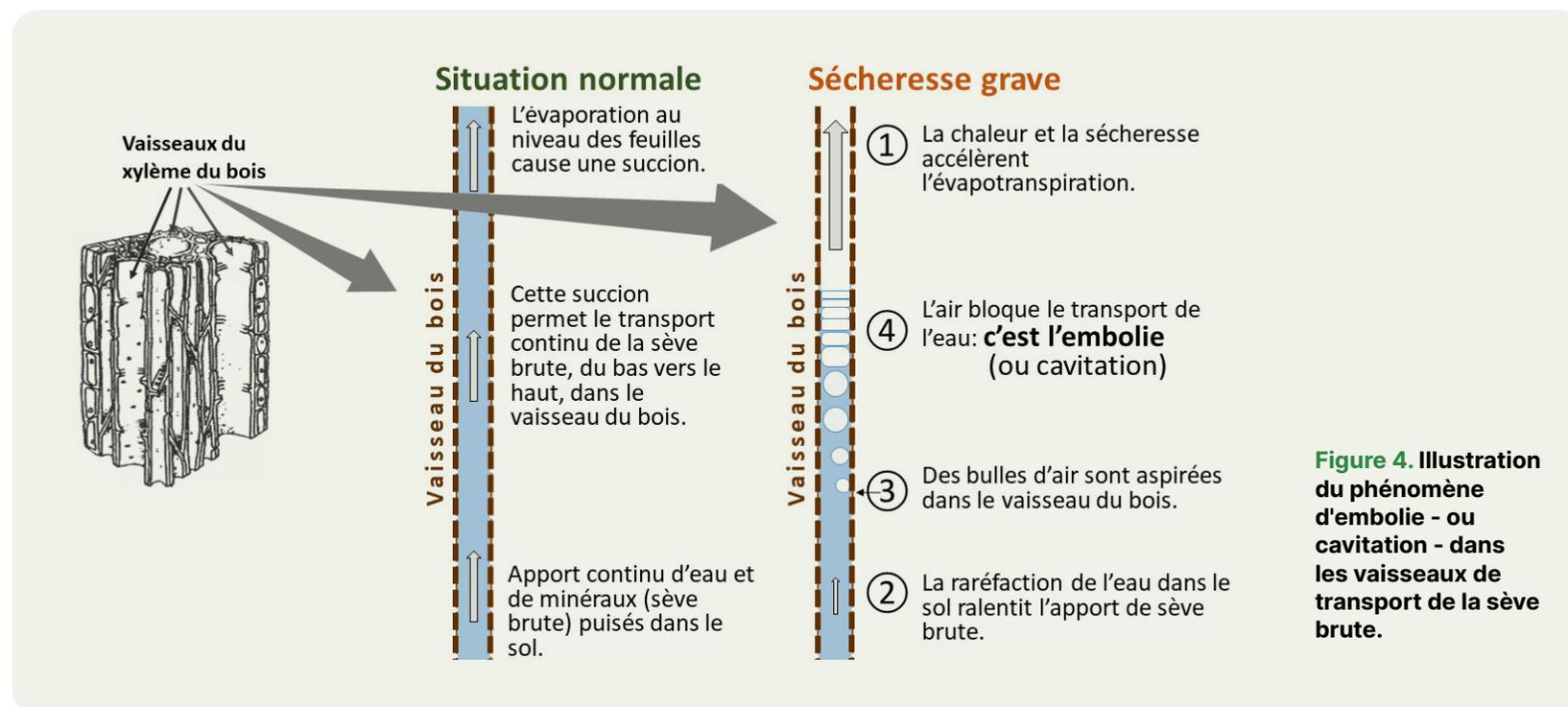
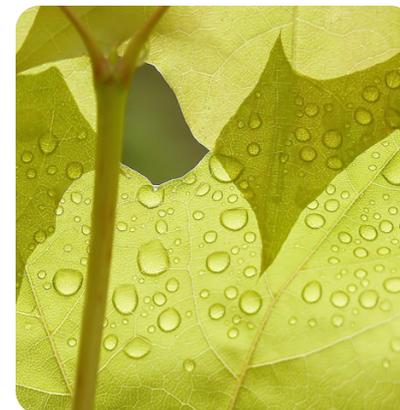
<sup>2</sup> Lajoie et Coll. 2016

# L'embolie

Chez les arbres, comme les autres plantes, la sécheresse peut entraîner un dysfonctionnement qu'on appelle l'embolie ou la cavitation.

En effet, dans un arbre, l'eau (ou sève brute) se déplace des racines jusqu'aux feuilles dans les vaisseaux du bois. Ce mouvement passif de l'eau vers le haut est provoqué par l'évapotranspiration au niveau des feuilles qui créent une succion dans ces vaisseaux. Comme dans une paille, l'eau est ainsi entraînée par capillarité jusqu'aux feuilles où elle participera à la photosynthèse.

Quand la température augmente, l'évaporation s'accélère, ainsi que le mouvement de l'eau des racines vers l'atmosphère. En période sèche, l'eau du sol ne suffit bientôt plus à approvisionner et à maintenir la colonne d'eau dans les vaisseaux de l'arbre. La succion, en se poursuivant, provoque l'apparition d'une bulle dans le vaisseau, qui crée un bouchon d'air et brise la continuité de la colonne d'eau nécessaire à sa circulation et à l'approvisionnement d'une partie des cellules de la plante. C'est l'embolie. Le phénomène est illustré à la **Figure 4**.



## L'EMBOLIE

La gravité de l'embolie dépend de la quantité de vaisseaux bloqués par de l'air, ainsi que de la capacité de l'arbre à y rétablir rapidement la circulation. Si le rétablissement tarde, des tissus de l'arbre mourront de ce manque d'approvisionnement en eau, causant la mort de quelques feuilles, d'une branche ou de l'arbre entier!

Ainsi, une baisse estivale du contenu en eau des sols forestiers, en causant des embolies, pourrait augmenter la mortalité d'arbres ou de parties d'arbres.



**Les arbres peuvent fermer les stomates de leurs feuilles pour limiter leur perte d'eau par évapotranspiration.**



**Les espèces feuillues** maintiennent plus volontiers l'ouverture de leurs stomates que les conifères. Elles continuent ainsi à capter le CO<sub>2</sub>, poursuivent leur photosynthèse et maximisent leur croissance tout le long de leur courte saison avec feuilles. Cette stratégie les rend cependant plus vulnérables à l'embolie.



**Les espèces résineuses** choisissent plus facilement de limiter leur perte d'eau en fermant leurs stomates. De cette façon, ainsi que grâce à l'étroitesse de leurs vaisseaux, ils s'exposent moins aux embolies. C'est tant mieux, puisqu'ils sont moins efficaces pour les réparer! Par contre, la fermeture des stomates ralentit la photosynthèse, la production de réserves de sucre et la croissance. Elle représente malgré tout un bon choix pour les résineux qui ont besoin de peu de réserves, n'ayant pas de nouveau feuillage à produire chaque printemps!

# Le stress hydrique

Un autre effet redouté du manque d'eau dans les sols forestiers est celui d'imposer aux arbres ce qu'on appelle le stress hydrique.

## Stress hydrique

On dit qu'un arbre est en stress hydrique s'il souffre d'un apport d'eau insuffisant de façon chronique.



Un arbre, installé sur un site où l'apport d'eau est fréquemment insuffisant, n'a souvent d'autres choix que d'économiser l'eau en réduisant la surface de son feuillage. Il limite ainsi son évapotranspiration et évite les embolies. Malheureusement, son feuillage réduit limite aussi sa photosynthèse, lui permettant de produire moins de sucre.

La baisse de production de sucre a de graves impacts sur les arbres. Il en résulte :

- **Une baisse de leur croissance et de leur vigueur**
- **Un ralentissement de la cicatrisation des blessures**
- **Une réduction de leur capacité à réagir et à se défendre contre les insectes ravageurs et les maladies**
- **Une augmentation de leur mortalité**
- **Une baisse de production de bois de la forêt**



MERN.GOUV.QC.CA



AIMFC.RNCAN.GC.CA

## Par exemple...

Le pourridé-agaric (armillaire couleur de miel) est un champignon assez répandu dans les sols forestiers. Il est susceptible de s'attaquer à la plupart des espèces d'arbres du sud du Québec, mais est connu pour concentrer ses ravages dans des forêts où les conditions de croissances sont peu favorables. C'est particulièrement le cas des peuplements qui subissent un stress hydrique. Il peut alors y causer d'importantes mortalités.

Le fait que le stress hydrique augmente la vulnérabilité des arbres aux ravages d'insectes et de maladies pourrait être particulièrement problématique dans le contexte des changements climatiques puisqu'ils favoriseront également la survie et la prolifération de plusieurs d'entre eux, jusqu'alors limités par notre climat froid.

# Enjeux climatiques saisonniers<sup>3</sup>

Habituellement, les interventions sylvicoles sont planifiées en fonction des saisons. Puisque nos quatre saisons seront affectées par les changements climatiques, il est important de connaître les principales modifications à attendre pour chacune, ainsi que leurs impacts, tant sur la forêt que sur les interventions sylvicoles. Voici une idée des nouvelles saisons telles que nous pourrions les vivre en 2050.

## Hiver 2050, en Montérégie



**Augmentation de la température moyenne de 3,1 °C**

**2050** : -4,7 °C  
(de -6,2 °C à -2,9 °C)

**Historique** : -7,8 °C



**Froids extrêmes moins fréquents**

Augmentation de 5 à 10°C de la température la plus froide de l'année



**33 mm de précipitations de plus**

(pluie et neige)  
**2050** : 256 mm  
(de 226 à 288 mm)

**Historique** : 223 mm



**Baisse de 42 % de la neige au sol**  
(au maximum)

**2050** : 0,7 m  
(de 1,0 m à 0,3 m)

**Historique** : 1,2 m

*Reproduit de CDAQ, 2021*

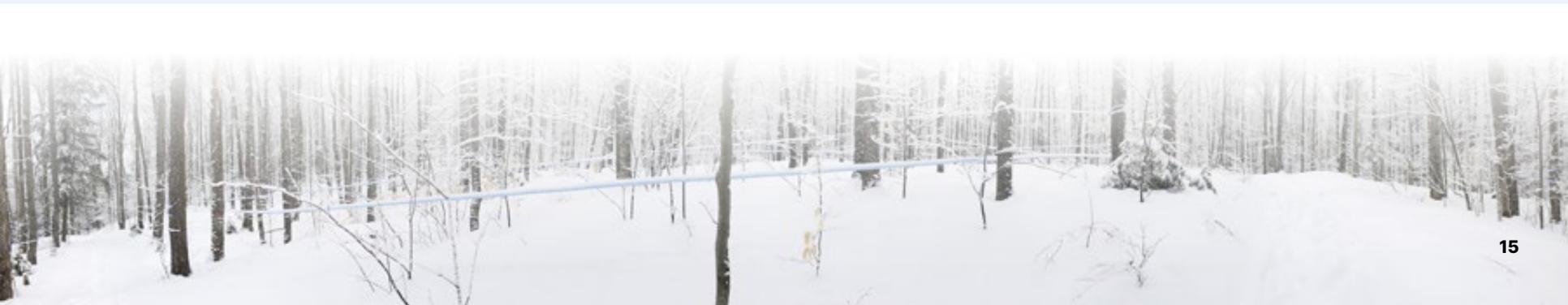


### Un hiver moins froid avec plus de pluie et moins de neige

Une augmentation importante des précipitations est attendue l'hiver, surtout sous forme de pluies. On risque donc de vivre un hiver d'alternance d'épisodes de neige et de pluie (décembre, janvier et février) avec de plus fréquents épisodes de gel et dégel. Les chutes de neige seraient moins abondantes et leurs accumulations, plus modestes et moins durables.

### Impacts potentiels sur la forêt et les activités sylvicoles

- \* La période durant laquelle les sols seront gelés serait raccourcie, réduisant d'autant la période propice à la réalisation de travaux sylvicoles.
- \* La protection de la végétation basse contre le froid et le broutement hivernal, assurée jusqu'alors par le couvert de neige, risque d'être plus restreinte et plus intermittente.
- \* Le risque de gel des racines serait accru puisque celui-ci survient surtout après un redoux hivernal, lorsque le couvert de neige au sol est mince et le sol gorgé d'eau, ce qui augmente la conductivité du gel en profondeur.
- \* La hausse des températures hivernales risque par ailleurs d'augmenter la survie des insectes ravageurs et, par conséquent, les dommages qu'ils causeront.
- \* Avec les cycles de gel/dégel successifs, les gaz dissous dans la sève peuvent former des bulles dans les vaisseaux du bois qui, le printemps venu, peuvent entraver la circulation de la sève brute. C'est ce qu'on appelle l'embolie hivernale.
- \* L'augmentation des épisodes hivernaux de verglas risque de causer davantage de bris de branches, de ploiement, d'étêtage d'arbres, soit un accroissement des blessures aux arbres ainsi que des portes d'entrée pour les maladies.
- \* Les températures clémentes et le couvert de neige restreint rendront les sols forestiers plus fragiles et limiteront l'accès à la forêt pour la récolte hivernale du bois.



# Printemps 2050, en Montérégie



**Dernier gel**  
(à -2 °C ou moins)  
**survenant 12 jours plus tôt**

**2050** : 18 avril  
(du 14 au 26 avril)

**Historique** : 30 avril



**Ajout de 594 degrés-jours (DJ) à la saison de croissance\***

**2050** : 2 681 DJ  
(de 2 380 à 2 895 DJ)

**Historique** : 2 087 DJ



**Ajout de 26 mm de pluie**

**2050** : 264 mm  
(de 243 à 291 mm)

**Historique** : 238 mm



**Ajout de 23 jours à la saison de croissance\***

**2050** : 239 jours  
(de 227 à 253 jours)

**Historique** : 216 jours

\* Saison de croissance : tant que la température moyenne excède 5,5 °C pendant 5 jours consécutifs.

Reproduit de CDAQ, 2021

## Dégel printanier plus hâtif, printemps un peu plus pluvieux

Le dégel pourrait être plus hâtif et allonger la saison de croissance. On observerait, en moyenne, une légère augmentation des précipitations printanières. L'activité acéricole pourrait débuter plus tôt, mais sa durée se maintiendrait.

## Impacts potentiels sur la forêt et les activités sylvicoles

- ⊗ La période propice aux travaux de récolte de bois serait écourtée en raison du dégel hâtif.
- ⊗ Un débourrement hâtif des bourgeons induit par des températures clémentes, combiné à des risques d'épisodes de gel tardifs, rendrait les jeunes feuilles plus vulnérables au gel.
- ⊗ La saison propice à la plantation d'arbres pourrait être devancée.
- ⊗ Le broutage par les cervidés serait accru en raison de la baisse de la mortalité hivernale résultant d'hivers plus cléments et des diminutions de l'épaisseur de neige au sol.
- ⊗ Après des pluies fortes, la qualité de l'ancrage des arbres est réduite par le taux d'humidité des sols. Ainsi, avec l'augmentation des précipitations printanières, on peut s'attendre à davantage de chablis, surtout avec l'accroissement attendu de la fréquence et de l'intensité des épisodes de vents violents.

# Été 2050, en Montérégie



**Ajout de 24 jours avec température maximale > 30 °C**

**2050** : 33 jours  
(de 18 à 48 jours)

**Historique** : 9 jours



**Augmentation du déficit hydrique de 43 mm**

**2050** : -163 mm  
(de -117 à -187 mm)

**Historique** : -120 mm



**Quantité de pluie similaire**

**2050** : 298 mm  
(de 281 à 329 mm)

**Historique** : 297 mm



**Pluies intenses plus fréquentes**

Davantage de cellules orageuses localisées

*Reproduit de CDAQ, 2021*

## Un été plus chaud avec des canicules plus fréquentes

Les jours très chauds seraient trois fois plus nombreux qu'historiquement. Les quantités totales de pluies se maintiendraient, mais sous forme d'épisodes de pluie moins fréquents mais plus intenses.

## Impacts potentiels sur la forêt et les activités sylvicoles

- ☀ Les grandes quantités de précipitations, concentrées dans des laps de temps très courts, favoriseront le ruissellement de l'eau au détriment de son infiltration dans le sol.
- ☀ Les températures élevées augmentant l'évapotranspiration, elles augmenteraient la demande d'eau des végétaux et la sécheresse du sol.
- ☀ La sécheresse des sols nuira à l'établissement de la régénération forestière, particulièrement celui d'espèces dont les semences nécessitent un substrat humide pour germer.
- ☀ Les sols plus secs risquent d'affecter la santé, la croissance et la survie des arbres, en causant des embolies ou par les conséquences du stress hydrique qu'ils induiront.
- ☀ Les pluies torrentielles accentueront également l'érosion des sols, notamment dans les sentiers de débardage et les chemins forestiers.

# Automne 2050, en Montérégie



**Augmentation de la température moyenne de 2,9 °C**

**2050** : 11,1 °C  
(de 9,7 à 12,4 °C)

**Historique** : 8,2 °C



**Premier gel (à 0 °C) survenant 14 jours plus tard**

**2050** : 27 octobre  
(du 18 octobre au 6 novembre)

**Historique** : 13 octobre



**Quantités de pluie similaires**

**2050** : 283 mm  
(de 267 à 323 mm)

**Historique** : 277 mm



**Fin de la saison de croissance survenant 11 jours plus tard**

**2050** : 28 novembre  
(du 21 novembre au 6 décembre)

**Historique** : 17 novembre

*Reproduit de CDAQ, 2021*

## Un automne moins froid

En 2050, les températures automnales seraient plus chaudes et les premiers gels plus tardifs.

## Impacts potentiels sur la forêt et les activités sylvicoles

 La saison de croissance des arbres et des autres végétaux se poursuivrait plus longtemps au cours de l'automne.

 Les espèces végétales capables de s'adapter à ce changement en conservant leur feuillage plus longtemps seraient susceptibles d'en profiter davantage en poursuivant plus longtemps leur croissance, y compris des espèces exotiques envahissantes comme le nerprun bourdaine.

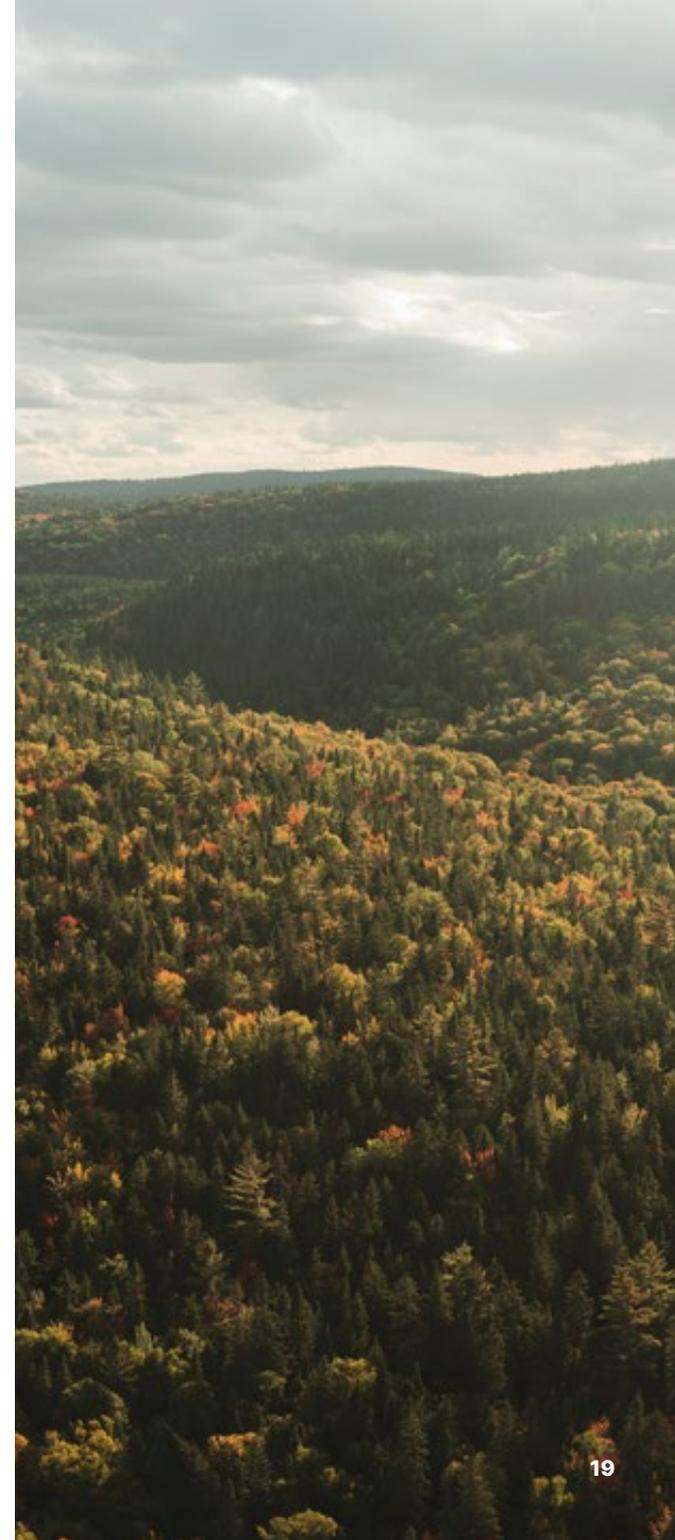
# Changements de composition des communautés forestières

Vu la rapidité des changements climatiques et la grande longévité des arbres, ces derniers subiront, à maturité, des conditions climatiques très différentes de celles qui prévalaient à leur installation. Incapables de déplacement, la capacité d'adaptation des individus ne suffira pas toujours à les garder en santé ou en vie. Ainsi, au gré de la mortalité et de l'établissement d'arbres, se produira une modification de la composition des forêts.

Les tendances de ces modifications des communautés sont cependant difficiles à prévoir. En théorie, en se basant sur les niches climatiques des espèces, on s'attendrait à une recrudescence d'espèces typiques des forêts du nord-est des États-Unis. Malheureusement, la migration naturelle des essences d'arbres est un phénomène lent. Ainsi, les températures plus clémentes aideront à la survie de nouvelles espèces qu'on plantera chez nous, mais leur migration naturelle surviendrait trop tard, alors que les conditions propices à ces espèces seraient rendues plus au nord. Sans aide, la migration naturelle ne permettrait pas que s'établisse un nouvel équilibre entre le climat et les besoins des essences de nos forêts.

L'agressivité des espèces à s'établir déterminera en partie celles qui réussiront à profiter de la place laissée vacante par les disparus, une qualité qu'on attribue aux espèces championnes du drageonnement, du rejet de souche ou de la production de semences, comme le hêtre, l'érable rouge ou les peupliers. Par contre, même ces dernières ne sont pas prometteuses à tout point de vue puisqu'on s'attend à la poursuite de la chute des espèces condamnées par des maladies ou des insectes exotiques, comme c'est le cas du hêtre, des frênes et des ormes, en plus du déclin des essences les plus sensibles à la sécheresse, dont font parties la plupart des peupliers.

On devra redouter des envahissements par des espèces exotiques envahissantes, connues pour être plus agressives et opportunistes que toutes nos essences indigènes. Elles risquent de montrer une efficacité stupéfiante à s'implanter, profitant des ressources inutilisées dans les boisés dégradés par la mort d'arbres condamnés, à moins que d'importants efforts soient consentis préventivement au développement d'une vigoureuse régénération en essences adaptées, permettant d'assurer leur avenir.



# Impacts attendus sur quelques types de forêts

Le Département de l'agriculture des États-Unis (USDA 2018) a étudié les impacts que pourraient avoir les changements climatiques sur les différents types de forêts des états de la Nouvelle-Angleterre. Certains d'entre eux s'apparentent à des forêts de la Montérégie. Nous présentons ici les grandes lignes de cette étude les concernant.



## Impacts attendus dans les forêts feuillues mésiques



### Forêts feuillues mésiques

*(Northern Hardwood et Transition Hardwood)*

**Principales essences :** Érable à sucre, bouleau jaune, hêtre à grandes feuilles

**Autres essences :** Pruche de l'est, épinette rouge, érable rouge, tulipier de Virginie, cerisier tardif, chêne rouge, pin blanc

**Impacts attendus :** Positifs et négatifs

**Capacité d'adaptation :** **Modérée à élevée**

**Niveau de risque :** **Faible à modéré**

## IMPACTS ATTENDUS DANS LES FORÊTS FEUILLUES MÉSIQUES

### Pressions sur les forêts feuillues mésiques

L'allongement de la saison de croissance augmenterait la productivité des forêts feuillues mésiques, mais seulement là où les taux d'humidité resteront adéquats malgré les conditions estivales plus sèches qui pourraient résulter des changements de patrons de précipitations et d'hydrologie. Des essences dominantes, y compris l'érable à sucre, risquent d'être fortement affectées par les fréquents gels-dégels, l'altération de processus du sol et le déclin de disponibilité de nutriments. Les épisodes de verglas et de chablis augmenteraient en fréquence et en sévérité, mais deviendraient également plus étendus, risquant même de modifier la dynamique naturelle de perturbations (par trouée) de ces forêts.

### Impacts sur les essences des forêts feuillues mésiques

On anticipe un déclin de l'habitat propice à plusieurs espèces communes, dont la pruche, le bouleau jaune, le peuplier faux-tremble, le pin blanc et, dans une moindre mesure, l'érable à sucre. Le hêtre à



grandes feuilles, ainsi que l'orme et le frêne d'Amérique risquent d'être trop affectés par des maladies ou insectes pour profiter de la place laissée vacante, contrairement l'érable rouge qui pourrait devenir plus abondant. D'autres espèces plus méridionales gagneraient également en habitat propice (chênes, cerisier tardif, tulipier de Virginie, sassafras).



### Facteurs de stress concomitants

On prévoit une amplification de l'effet de la maladie corticale du hêtre et de la spongieuse européenne, ainsi que de la pression mise par d'autres insectes ravageurs (dont le puceron lanigère de la pruche qui pourrait avoir un impact considérable sur les peuplements qui perdront leurs pruches et le risque lié à l'arrivée potentielle du longicorne asiatique), les plantes exotiques envahissantes et le broutement par le cerf.

# Impacts attendus dans les forêts feuillues humides



## Forêts feuillues humides

(Lowland and Riparian Hardwood)

**Principales essences :** Frêne d'Amérique, frêne de Pennsylvanie, érable rouge, érable argenté

**Autres essences :** Chêne bicolore, orme d'Amérique, bouleau gris

**Impacts attendus :** Positifs et négatifs

**Capacité d'adaptation :** **Modérée à élevée**

**Niveau de risque :** **Modéré**

## Pressions sur les forêts feuillues humides

Possibilité d'altération substantielle du régime hydrique de ces forêts. Risque d'inondations excessives, d'érosion des berges et, entre les événements de précipitations extrêmes, des sécheresses prolongées causant d'importants dommages aux espèces à enracinement superficiel.

## Effets sur les essences des forêts feuillues humides :

Beaucoup des essences principales peuvent résister à un climat plus chaud : orme d'Amérique, érable argenté, peuplier deltoïde. À l'inverse, on attend un déclin de certaines autres : sapin baumier, bouleau blanc, thuya occidental.

## Facteurs de stress concomitants

On attend des impacts négatifs causés par plusieurs plantes exotiques envahissantes dont le nerprun, en plus de maladies et d'insectes ravageurs comme le puceron lanigère de la pruche.



Nerprun bourdaine

# Impacts attendus dans les forêts résineuses et mixtes de basse altitude



## Forêts résineuses et mixtes de basse altitude

*(Lowland mixed conifer et Low elevation spruce-Fir)*

**Principales essences :** Épinette noire, épinette rouge, mélèze laricin, sapin baumier, épinette blanche

**Autres essences :** Pruche de l'est, érable rouge, thuya occidental, frêne noir, bouleau jaune

**Impacts attendus :** Neutres à négatifs

**Capacité d'adaptation :** **Faible à modérée**

**Niveau de risque :** **Modéré à élevé**

## Pressions sur les forêts résineuses et mixtes de basse altitude

Ces forêts fonctionnent dans des conditions de sol et d'hydrologie susceptibles d'être fortement perturbées : augmentation de pluies torrentielles, d'inondations, changement de la nappe phréatique et risques de sécheresse. Forêts particulièrement vulnérables aux températures plus chaudes et à l'allongement de la saison de croissance. Augmentation de productivité possible sur les sites où sera maintenue humidité du sol, mais la chaleur et la sécheresse pourraient perturber le cycle des nutriments, causer une panne des sols organiques et augmenter le stress et causer des problèmes de régénération ou modifier la composition en faveur d'essences feuillues déjà présentes. Augmentation de la fréquence de fortes tempêtes entraînant des chablis et la mort d'arbres.

## Effets sur les essences des forêts résineuses et mixtes de basse altitude

Déclin significatif attendu de l'habitat propice à plusieurs essences, dont surtout l'épinette noire, le baumier, le thuya occidental et l'épinette rouge. On s'inquiétait déjà pour la pérennité du thuya occidental, notamment à cause des cerfs. Le pin blanc et les essences feuillues deviendront plus compétitifs.

## Facteurs de stress concomitants

Augmentation du broutement par le cerf.

# Dommmages causés par des espèces exotiques envahissantes

## Plantes exotiques envahissantes

La diminution des contraintes climatiques risque d'augmenter la vitalité de la plupart des espèces de plantes exotiques envahissantes, leur donnant un essor pour coloniser de nouveaux milieux. Ce sera le cas pour les espèces déjà présentes dans nos forêts et pour celles qui se trouvent aux portes de la région.

Avec leur capacité d'adaptation exceptionnelle et leurs stratégies de colonisation efficaces, ces espèces profiteront de la lumière et de la place libérées par la mort des arbres affectés par les trop rapides modifications du climat ou d'habitat.

À titre d'exemple, les états de la Nouvelle-Angleterre redoutent l'arrivée et les ravages des pires plantes exotiques envahissantes des États-Unis, dont le kutzu (*Pueraria montana*), le chèvrefeuille de Tartarie (*Lonicera tatarica*) et le troène commun (*Ligustrum vulgare*).

## Insectes ravageurs

À nos latitudes, les grands froids et la courte saison de croissance ont toujours exercé un contrôle efficace sur un grand nombre d'espèces d'insectes, dont les ravageurs forestiers. Qu'ils proviennent des États-Unis ou d'Asie, le réchauffement favorisera l'installation, la survie, et la croissance des populations et, par conséquent, augmentera les probabilités d'infestations et les dommages.

### Pensez-y !

La plupart des insectes ravageurs causent des dommages marginaux aux arbres qui vivent dans des conditions propices. Par contre, ils deviennent plus agressifs et affectent davantage la santé ou la survie des arbres vivant déjà un ou plusieurs stress. Ainsi, en favorisant le stress hydrique, les changements climatiques risquent d'avoir le double effet d'accroître les populations d'insectes et la vulnérabilité des arbres.



Puceron lanigère de la pruche  
WIKIMEDIA.ORG

### Nouveaux ravageurs exotiques venus du chaud...

De plus en plus, on peut craindre l'arrivée d'insectes ravageurs mal adaptés au climat froid. On craint notamment l'arrivée du puceron lanigère de la pruche (*Adelges tsugae*) qui cause la mort des pruches et dont on a récemment détecté la présence dans l'est de l'Ontario.

### Le saviez-vous?

Chez le dendroctone méridional du pin (*Dendroctonus frontalis*), dont l'arrivée est redoutée dans des états de Nouvelle-Angleterre, on estime qu'une nuit sous les -16 à -18°C entraîne la mort de 90 % des individus. Dans un cas comme celui-là, l'augmentation des minimums de températures de quelques degrés peut faire toute la différence!

# Adapter sa forêt aux changements climatiques

Rendre les forêts mieux adaptées aux conditions climatiques qui s'annoncent nécessitera de revoir quelque peu nos façons de faire de l'aménagement forestier. Mais c'est surtout à l'étape du diagnostic sylvicole et de la planification des travaux que les efforts devront être mis pour intégrer ces nouvelles préoccupations aux décisions d'aménagement forestier.

## Intégrer les changements climatiques aux décisions d'aménagement forestier - Démarche proposée

La démarche suggérée pour intégrer des changements climatiques aux décisions d'aménagement forestier propose les **5 étapes** suivantes :

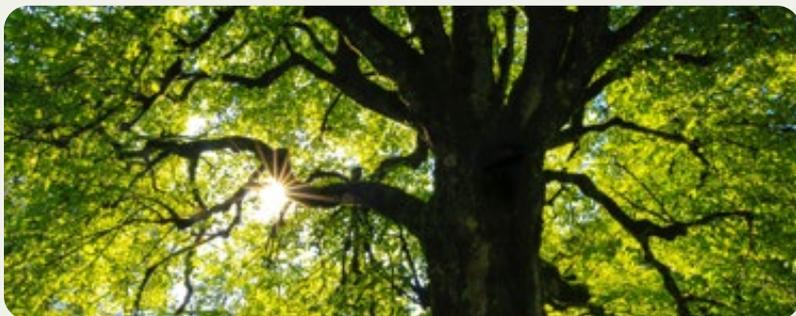
**Étape 1** Identifier le peuplement visé et ses caractéristiques

**Étape 2** Évaluer le niveau de risque du peuplement

**Étape 3** Évaluer la capacité d'adaptation et les enjeux du peuplement

**Étape 4** Déterminer l'approche à adopter

**Étape 5** Identifier les objectifs d'aménagement et les moyens à mettre en œuvre

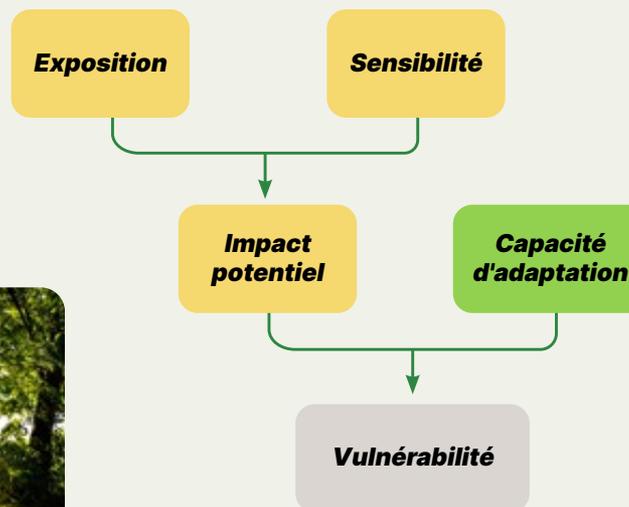


### **Étape 1** Identifier le peuplement visé et ses caractéristiques

- Identifier le peuplement
- Décrire la composition et les caractéristiques :
  - de sa strate dominante
  - de sa strate intermédiaire
  - de sa strate inférieure (gaulis et semis)
- Identifier les objectifs du propriétaire
- Identifier les cadres temporels visés (court terme, moyen terme, long terme)

## Étape 2 Évaluer le niveau de risque du peuplement

Quand on s'intéresse à l'**impact potentiel** des changements climatiques sur une forêt, on s'intéresse à son **exposition** et à sa **sensibilité** à ce stress.



Reproduit de Glick et al. 2011

**Figure 5.** Composantes de la vulnérabilité à un stress (relation entre l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation)

### Exposition à un stress

L'exposition d'un arbre ou d'une forêt à un facteur de stress est très largement déterminée par son site. En effet, ce dernier impose à l'arbre ses caractéristiques topographiques (pente, orientation), celles de son sol (texture, richesse, drainage) ainsi que les conditions climatiques locales (températures, précipitations, humidité de l'air), auxquelles il ne peut échapper.

*Ex. : Une érablière située en sol mince sur un flanc exposé au sud près du sommet d'une colline est particulièrement exposée au stress hydrique (sécheresse chronique).*

### Sensibilité à un stress

La sensibilité d'un arbre, d'une espèce ou d'une forêt à un stress est largement déterminée par l'efficacité des stratégies adoptées par son espèce (ou par les espèces qui la composent si on parle d'une forêt) pour continuer à fonctionner malgré le stress qui lui est imposé.

*Ex. : Les pins et les chênes sont peu sensibles à la sécheresse, parce que leurs espèces ont développé une bonne résistance à l'embolie.*

En forêt, la sécheresse étant le stress le plus redouté en lien avec les changements climatiques attendus, Anecou et coll. (2021) ont développé une méthodologie pour illustrer l'exposition (d'une part celle liée aux conditions du terrain - nature des sols, régime hydrique, topographie – et d'autre part celle qui résulte du changement de climat) et la sensibilité des peuplements forestiers à la sécheresse. Des cartes illustrant ces deux types d'expositions et la sensibilité des peuplements forestiers de la Montérégie à la sécheresse par cette méthode sont présentées aux **annexes 1, 2 et 3** de ce guide.

## Déterminer le niveau de risque (impacts potentiels)

Pour évaluer le niveau de risque d'un peuplement face aux changements climatiques, on doit considérer à la fois le risque d'impacts lié à la sécheresse et le risque d'impacts lié à d'autres facteurs de stress, comme le montre la première colonne du schéma de la **Figure 6**. La deuxième colonne propose les questions à se poser pour parvenir à évaluer chacun de ces risques d'impacts. Les colonnes de droite suggèrent des cartes et d'autres moyens d'obtenir l'information pour répondre aux questions.

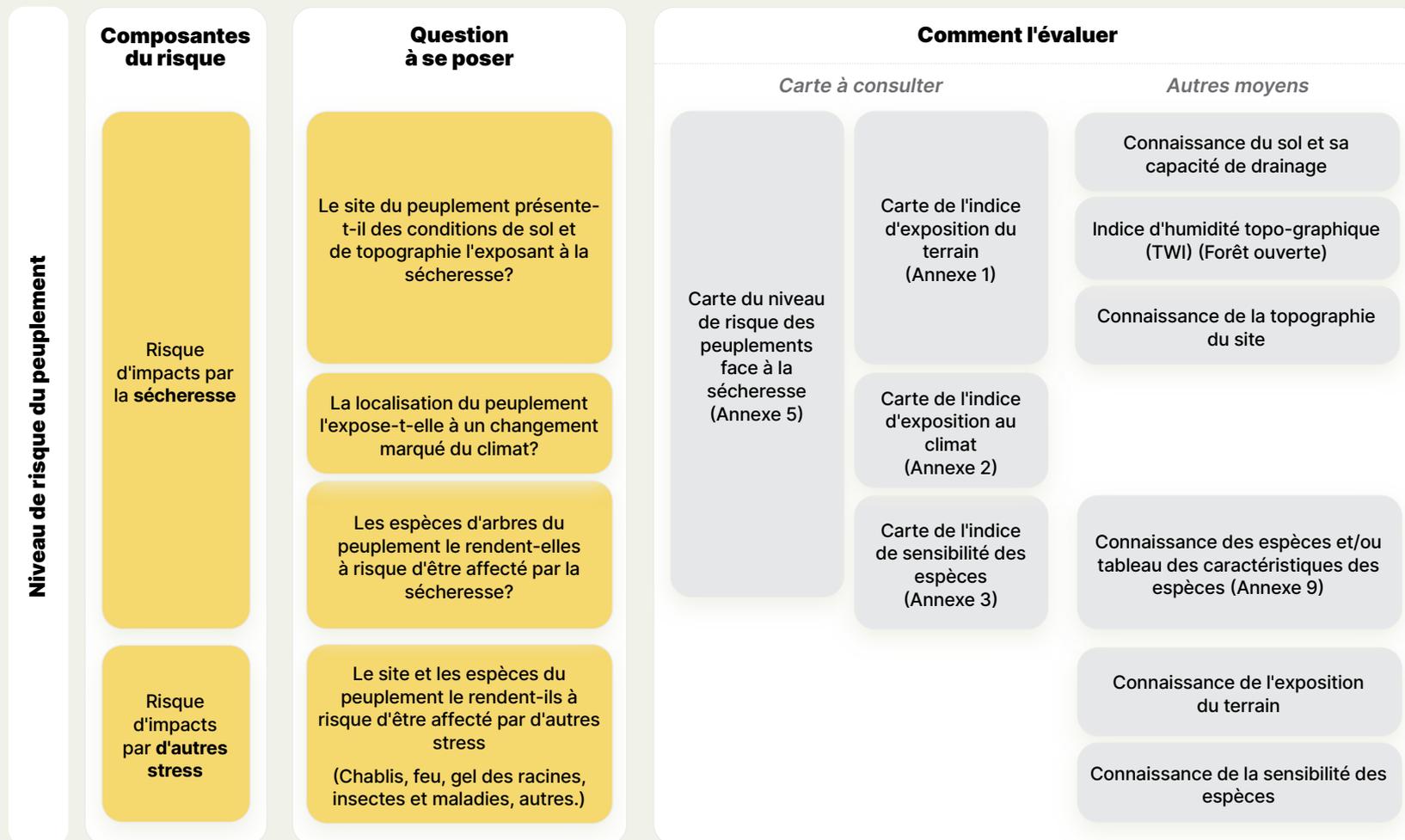
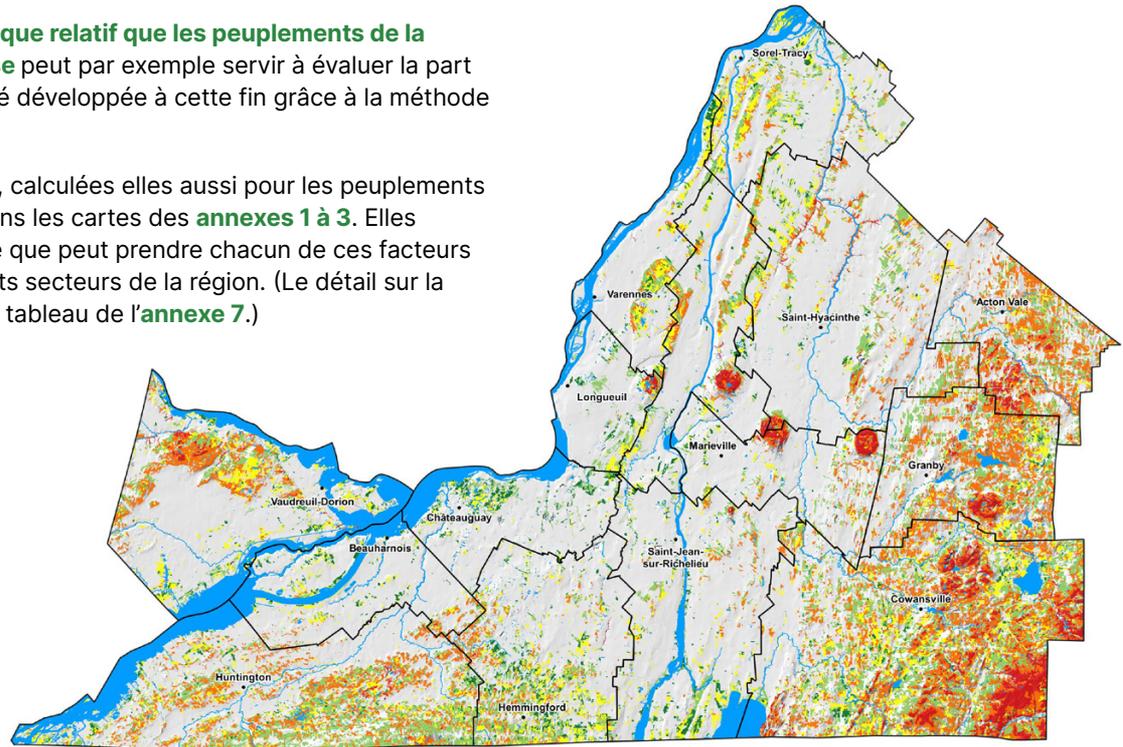


Figure 6. Schéma des éléments à considérer pour évaluer le niveau de risque d'un peuplement forestier.

La carte suivante, présentant le niveau de risque relatif que les peuplements de la région subissent les impacts de la sécheresse peut par exemple servir à évaluer la part du risque attribuable à la sécheresse. Elle a été développée à cette fin grâce à la méthode développée par Anecou et coll. (2021).

Les valeurs des trois indices qui la composent, calculées elles aussi pour les peuplements de la Montérégie, sont également illustrées dans les cartes des annexes 1 à 3. Elles contribuent à se faire une idée de l'importance que peut prendre chacun de ces facteurs d'exposition et de sensibilité, dans les différents secteurs de la région. (Le détail sur la composition de chaque indice est présenté au tableau de l'annexe 7.)

**Figure 7. Carte illustrant le niveau de risque que les peuplements forestiers de la Montérégie subissent les impacts de la sécheresse** (intègre 3 indices liés à la sécheresse : exposition du terrain, exposition au climat, sensibilité des espèces)



Carte reproduite en grand à l'annexe 5.

Risque d'impacts : Plus à risque Moins à risque

### Étape 3

## Évaluer la capacité d'adaptation et établir la liste des enjeux du peuplement

Outre son niveau de risque, on doit également considérer la capacité d'adaptation du peuplement pour choisir l'approche à privilégier pour adapter un peuplement aux changements climatiques.

### Déterminer la capacité d'adaptation

Ici, on s'intéresse moins à la capacité du peuplement à résister aux stress, mais plutôt à sa capacité à se rétablir s'il subissait une dégradation importante. Le schéma suivant aide à voir les principaux éléments à considérer pour évaluer la capacité d'adaptation des peuplements. Il présente des questions à se poser et propose des moyens pour l'évaluer.

**Question à se poser**

Le peuplement présente-t-il une grande diversité d'espèces pour le prémunir contre diverses menaces?

Le paysage présente-t-il une importante diversité d'espèces à même de permettre leur retour?

Les espèces du peuplement ont-elle de la facilité à se régénérer?

La régénération en espèces d'avenir laisse-t-elle présager une belle relève du peuplement?

La structure du peuplement est-elle favorable à l'établissement/croissance de la régénération

Peut-on écarter le risque que des cerfs compromettre la régénération du peuplement?

Peut-on écarter le risque que des plantes envahissantes compromette sa régénération ?

Peut-on écarter le risque que d'autre menaces compromettre la régénération du peuplement?

**Comment l'évaluer**

*Cartes à consulter*

Carte de l'indice de capacité d'adaptation (Annexe 4)

Carte des densités cerfs (Annexe 8)

*Autres moyens*

Diversité spécifique, nombre effectif d'espèces, diversité fonctionnelle (Annexe 10)

Connaissance du territoire

Connaissance des espèces

Quantité de régénération en essences d'avenir

Présence de semenciers, conditions de germination

Connaissance du site

Connaissance du territoire

Connaissance du territoire et du site

**Figure 8.** Schéma des éléments à considérer pour évaluer la capacité d'adaptation d'un peuplement forestier.

**Établir la liste des enjeux**

La liste des enjeux du peuplement forestier peut être établie d'une part en retenant chacun de ceux pour lesquels on aurait répondu « Oui » aux questions à se poser pour évaluer le niveau de risque du peuplement forestier proposées au schéma de la **figure 6**.

Cette liste peut être complétée en y ajoutant d'autre part les enjeux qui contribueraient à nuire à la capacité d'adaptation du peuplement, soit ceux pour lesquels on aurait répondu « Non » aux questions proposées au schéma de la **figure 8**.

## Étape 4 Déterminer l'approche à adopter pour le peuplement

Pour faire face aux changements climatiques, les approches de résistance, de résilience et de transition sont les 3 options proposées pour rendre les peuplements forestiers mieux adaptés. Comme leur nom l'indique, elles visent soit à **améliorer la résistance de la forêt**, à **en améliorer la résilience** ou encore à **y amorcer une transition** qui en fera ultimement une forêt différente, mieux adaptée aux changements qui s'annoncent.

### Choix de l'approche à privilégier

Pour nous aider à choisir l'approche ou les approches sylvicoles à privilégier pour un peuplement forestier, on se base principalement sur son risque de subir des impacts (niveau de risque) ainsi que sur sa capacité d'adaptation. Une méthode pour les évaluer est présentée aux étapes 2 et 3 qui précèdent. Le (ou les) cadre(s) temporel(s) retenu(s) sont également considérés dans le choix de l'approche (ou des approches) à privilégier. C'est aussi le cas des objectifs du propriétaire. La figure suivante illustre dans quel cas l'une ou l'autre des approches peut être privilégiée.

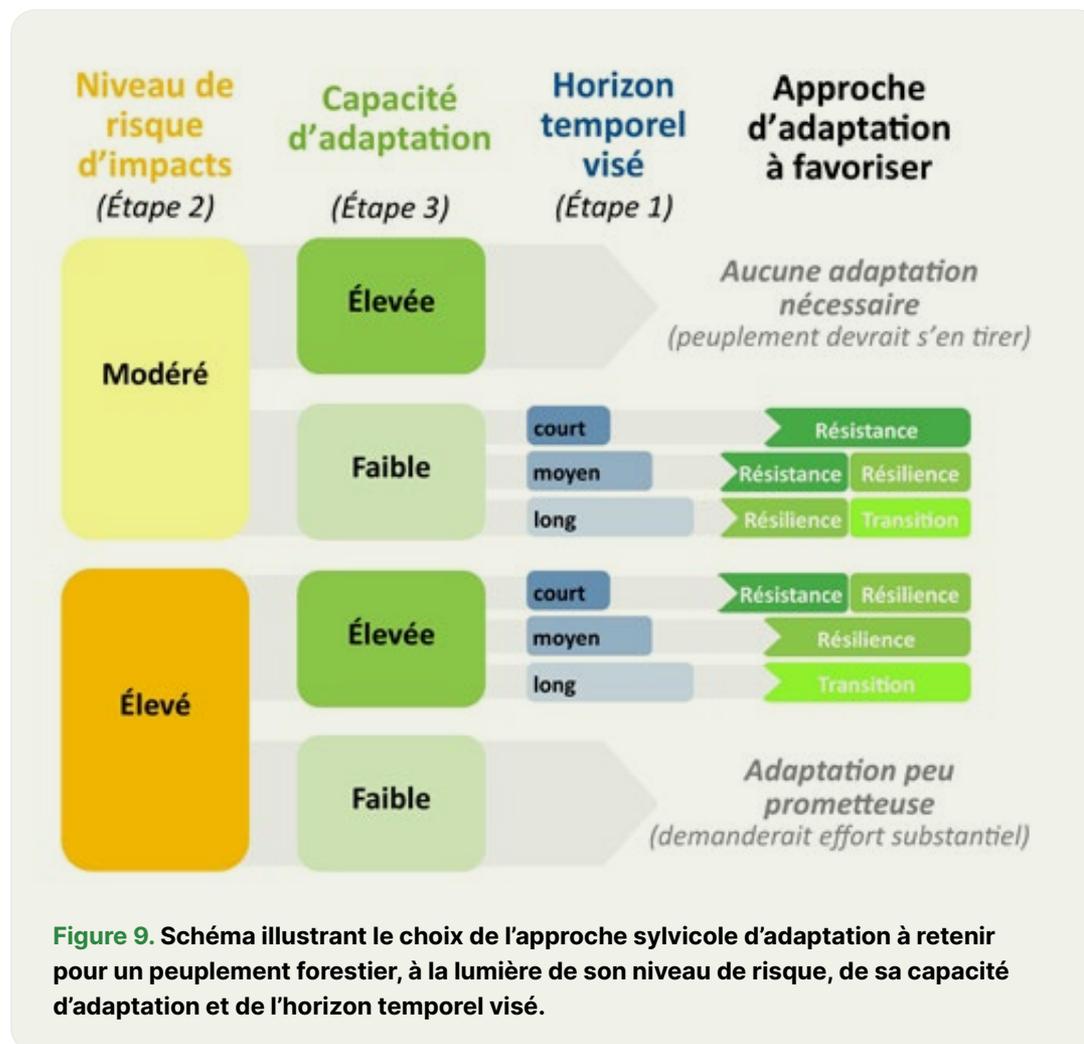


Figure 9. Schéma illustrant le choix de l'approche sylvicole d'adaptation à retenir pour un peuplement forestier, à la lumière de son niveau de risque, de sa capacité d'adaptation et de l'horizon temporel visé.

**Tableau 1. Présentation des trois approches sylvicoles d'adaptation des forêts**

Approche	Approche de <u>résistance</u> 	Approche de <u>résilience</u> 	Approche de <u>transition</u> 
<b>Définition</b>	<b>Résistance d'une forêt :</b> sa capacité à ne pas être affectée négativement par un stress ou une perturbation, sa capacité à se maintenir dans son état initial.	<b>Résilience d'une forêt :</b> sa capacité à retrouver un fonctionnement ou un développement normal après avoir été perturbée par un stress.	<b>Transition d'une forêt :</b> son passage graduel vers un état différent de son état initial (par la transformation de sa structure et de sa composition), pour en faire un écosystème forestier différent.
<b>Objectif visé</b>	Favoriser la <b>résistance</b> de la forêt, soit faire en sorte que le peuplement soit le moins affecté possible par les changements climatiques qui s'annoncent.	Favoriser la <b>résilience</b> de la forêt, soit modifier le peuplement pour le rendre plus apte à se remettre rapidement des perturbations qu'il subira.	Permettre la <b>transition</b> de la forêt, soit de transformer substantiellement un peuplement vulnérable pour en faire un, à terme, qui sera mieux adapté aux changements attendus.
<b>Stratégies en milieu forestier</b>	Améliorer les systèmes de défense de la forêt en place pour favoriser son maintien dans un état assez semblable au sien.	Améliorer la santé des forêts et favoriser sa transformation graduelle de la forêt pour la rendre mieux adaptée, permettre son rétablissement rapide à un état semblable à l'état initial, suite à une perturbation.	Préparer la forêt en favorisant sa régénération et en assurant le retour rapide d'une nouvelle forêt suite à une perturbation.
<b>Horizon temporel</b>	Horizon temporel <b>court</b> (10 - 30 ans) à <b>moyen</b> (30-50 ans)	Horizon temporel <b>moyen</b> (30-50 ans) à <b>long</b> (+ de 50 ans)	Horizon temporel <b>long</b> (+ de 50 ans)
<b>Forêt visée</b>	<b>Forêt peu vulnérable</b>	<b>Forêt moyennement vulnérable</b>	<b>Forêt vulnérable ou très vulnérable</b>
<b>Strate visée</b>	Si on vise un horizon temporel court, on travaillera surtout la strate dominante soit celle composée des arbres dominants et codominants, formant déjà le couvert forestier. Si on vise un horizon temporel moyen, on travaillera surtout la strate intermédiaire soit les arbres qui seront amenés à prendre la relève de ceux qui dominent le peuplement.	Par cette approche on travaille surtout les strates inférieures (intermédiaire et inférieure) ; les arbres qui seront amenés à prendre la relève de ceux qui dominent le peuplement.	Par cette approche on travaille surtout la strate inférieure (gaulis et semis) et les arbres semenciers susceptibles de contribuer à la régénération du peuplement. Selon certains, l'approche de transition comprend nécessairement l'apport d'une régénération artificielle.

## Étape 5

# Identifier les objectifs d'aménagement et les moyens à adopter

Différents objectifs d'aménagement et différents moyens peuvent être mis en œuvre dans le cadre de chacune des approches proposées pour adapter les peuplements forestiers pour faire face aux changements climatiques.

## Des moyens pour favoriser la résistance

Pour améliorer la résistance des forêts face aux changements globaux, on peut adopter les objectifs d'aménagement et les moyens présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 2. Objectifs d'aménagement et moyens pouvant être adoptés dans le cadre de l'approche favorisant la résistance des peuplements forestiers.**

Objectif d'aménagement	Moyens pour favoriser la <u>résistance</u> des peuplements
<p><u>Court terme :</u></p> <p><b>Améliorer la santé et l'équilibre de la forêt en travaillant surtout sa strate supérieure (arbres dominants et codominants)</b></p> <p><u>Moyen terme :</u></p> <p><b>Améliorer la santé et l'équilibre de la forêt en travaillant surtout la strate intermédiaire</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégrer au plan d'aménagement forestier et au diagnostic sylvicole, une analyse :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- des niveaux de risques face à la sécheresse et aux autres stress</li> <li>- de la diversité de la composition et de la structure</li> </ul> </li> <li>• Aménagement favorisant la qualité (santé) des tiges en prélevant :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- les tiges défectueuses et non vigoureuses</li> <li>- les tiges des essences les plus à risque</li> </ul> </li> <li>• Aménagement diversifiant la structure et la composition</li> <li>• Maintien d'une grande surface terrière, dans les secteurs à risque</li> <li>• Assurer un apport de lumière suffisant pour éviter que la croissance des arbres ne stagne</li> <li>• Ouvrir le couvert par des éclaircies ou des coupes de jardinages réalisées, si possible à intervalles courts</li> <li>• Choisir des essences à enracinement profond capable d'éviter la sécheresse</li> <li>• Choisir des essences moins propices à l'embolie/ capables de s'en remettre</li> <li>• Identifier les autres stress les plus menaçants et favoriser les essences qui y résistent le mieux</li> <li>• Favoriser la diversité du peuplement pour tenir compte de l'incertitude</li> </ul>
<p><b>Favoriser l'équilibre des écosystèmes forestiers en maintenant/améliorant la diversité de composition, d'âges et de structure des peuplements</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenir/améliorer la diversité de composition en essences des peuplements</li> <li>• Favoriser le maintien //amélioration de la richesse et de la diversité en espèces               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenir/améliorer la diversité d'âges des arbres au sein des peuplements</li> <li>- Favoriser la présence de peuplements d'âges différents</li> </ul> </li> <li>• Maintenir/améliorer la diversité de la structure des peuplements               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Favoriser la présence de la strate des semis, des gaulis, des petites tiges (perchis) et des grosses tiges au sein des peuplements</li> </ul> </li> <li>• Favoriser la diversité des travaux (nature des travaux, intensité de la récolte) et les répartir dans le temps</li> <li>• Évaluer / augmenter la proportion d'essences compagnes dans les érablières exploitées</li> </ul>
<p><b>Favoriser les conditions d'humidité des sols propices à la santé des arbres</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planification des chantiers forestiers (chemins, sentiers de débardage, etc.) pour maximiser la rétention de l'eau en forêt</li> <li>• Éviter le drainage des sols forestiers</li> <li>• Éviter la compaction des sols forestiers par la machinerie grâce à un réseau de chemins de débardage centralisant leur passage</li> <li>• Éviter les carences du sol en éléments nutritifs susceptibles d'accentuer les impacts du manque d'eau (favoriser la présence de bois mort au sol et une diversité d'espèces d'arbres)</li> </ul>



## Des moyens pour favoriser la résilience

Si on a pour objectif, à moyen terme, d'améliorer de la résilience des forêts face aux changements globaux, les objectifs et les moyens présentés dans le tableau suivant peuvent être mis en œuvre.



**Tableau 3. Objectifs d'aménagement et moyens pouvant être adoptés dans le cadre de l'approche favorisant la résilience des peuplements.**

Objectif d'aménagement	Moyens pour favoriser la <u>résilience</u> des peuplements
<p><b>Améliorer la strate intermédiaire de la forêt</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rajeunir le peuplement par une récolte concentrée surtout sur la strate dominante</li> <li>• Maintenir une surface terrière moyenne (12 à 18 m<sup>2</sup>/ha) pour en favoriser la strate intermédiaire</li> <li>• Récolte prioritaire des tiges non vigoureuses (ex.: coupe progressive d'ensemencement)</li> <li>• Choisir une sylviculture irrégulière proche de la nature et favoriser l'atteinte d'une structure jardinée ou irrégulière (composé d'arbres d'âges différents) d'essences mélangées pour assurer le maintien d'un couvert forestier, au moins partiel en cas de problème</li> <li>• Intégrer au plan d'aménagement forestier et au diagnostic sylvicole, une analyse :             <ul style="list-style-type: none"> <li>- des niveaux de risques face à la sécheresse et aux chablis</li> <li>- de la diversité de la composition et de la structure</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Favoriser la diversité dans la strate intermédiaire</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenir/améliorer la diversité de composition en essences des peuplements</li> <li>• Favoriser le maintien //l'amélioration de la richesse et de la diversité en espèces             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenir/améliorer la diversité d'âges des arbres au sein des peuplements</li> <li>- favoriser la présence de peuplements d'âges différents</li> </ul> </li> <li>• Favoriser la présence d'une grande diversité d'espèces dans la strate intermédiaire, si possible celles qui résisteront le mieux aux stress attendus,             <ul style="list-style-type: none"> <li>- lors du choix des tiges à maintenir lors du martelage pour travaux commerciaux</li> <li>- par le choix des essences lors de reboisement artificiel</li> <li>- par des plantations d'enrichissement des peuplements naturels</li> <li>- par le choix des tiges de la strate intermédiaire à dégager</li> </ul> </li> <li>• Maintien prioritaire des semenciers de diverses essences résistantes</li> <li>• Favoriser l'émergence et le maintien d'une régénération abondante et diversifiée             <ul style="list-style-type: none"> <li>- par le maintien de semenciers, le scarifiage,</li> <li>- la plantation d'enrichissement et la protection contre le broutement</li> </ul> </li> <li>• Maintenir ou améliorer la diversité en essences au sein de la strate intermédiaire et au sein de celle des gaulis et des semis</li> <li>• S'assurer de la présence, en abondance, de toutes les classes de hauteurs d'arbres</li> </ul>
<p><b>Éviter de fragiliser le peuplement</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éviter de fragiliser le peuplement en favorisant les conditions d'humidité des sols propices à la survie des arbres             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Planification des chantiers forestiers maximisant la rétention d'eau en forêt (chemins, sentiers de débardage, etc.)</li> <li>- Éviter le drainage des sols forestiers</li> <li>- Éviter la compaction des sols forestiers par la machinerie grâce à un réseau de chemins de débardage qui centralisent leur passage</li> </ul> </li> <li>• Diversifier la nature et l'intensité des interventions pour tenir compte de l'importante incertitude entourant les changements climatiques et leurs solutions</li> </ul>



## Des moyens pour permettre la transition

Pour préparer la forêt sur un horizon temporel plus long, pour faciliter sa régénération advenant sa dégradation ou sa destruction et assurer le retour rapide d'une nouvelle forêt mieux adaptée aux conditions futures, les objectifs d'aménagement et les moyens présentés dans le tableau suivant peuvent être mis en œuvre.

**Tableau 4. Objectifs d'aménagement et moyens pouvant être adoptés dans le cadre de l'approche permettant la transition des peuplements.**

Objectif d'aménagement	Moyens pour favoriser la <u>transition</u> des peuplements
<b>Travailler le peuplement au profit de l'établissement d'une régénération apte à prendre la relève</b>	 <ul style="list-style-type: none"><li>• Intégrer au plan d'aménagement forestier et au diagnostic sylvicole une analyse :<ul style="list-style-type: none"><li>- des niveaux de risques face à la sécheresse et aux autres stress</li><li>- de la diversité de la composition et de la structure</li></ul></li><li>• Viser l'établissement d'une régénération vigoureuse, diversifiée et adaptée au site et aux conditions à venir</li><li>• Ouvrir fortement le couvert forestier (ex : <i>maintien surface terrière de 9-16m<sup>2</sup>/ha</i>)</li><li>• Maintien d'une grande surface terrière, dans les secteurs à risque</li><li>• Si une régénération adaptée est déjà établie,<ul style="list-style-type: none"><li>- en favoriser le développement (ex. : <i>travaux d'éducation de peuplement, ouverture du couvert, etc.</i>)</li></ul></li><li>• En l'absence d'une régénération adaptée,<ul style="list-style-type: none"><li>- et en présence de semenciers d'espèces adaptées,<ul style="list-style-type: none"><li>◦ favoriser l'établissement d'une telle régénération naturelle (ex.: <i>coupe progressive d'ensemencement avec maintien des semenciers d'essences adaptées et scarifiage, protection de la régénération</i>),</li></ul></li><li>- mais en l'absence de tels semenciers,<ul style="list-style-type: none"><li>◦ installer une régénération artificielle diversifiée et adaptée (ex.: <i>coupes progressives par trouées, plantation d'enrichissement, installation de protecteurs</i>)</li></ul></li></ul></li></ul>

## Des moyens pour faire face à l'incertitude

Vu la multitude des menaces qui pourraient affecter nos forêts en lien avec les changements climatiques et l'impossibilité de présumer de celles qui frapperont localement le plus fort, il serait difficile d'établir avec grande confiance les essences forestières à favoriser ou encore de proposer quelques solutions simples pour faire face aux enjeux forestiers qui y sont liés. Les solutions devront clairement être multiples.

Une recommandation ressort néanmoins du lot comme la plus souvent mentionnée en lien avec l'adaptation des forêts pour faire face aux changements climatiques : celle de favoriser la diversité de la forêt. En effet, une multitude d'études, menées depuis les années 1990, tendent à indiquer que la diversité des organismes composant un écosystème, notamment un écosystème forestier, le rendrait plus productif et plus résilient face aux changements climatiques.



## La diversité : un outil clé pour l'adaptation des forêts

La popularité de recommander la diversité forestière vient de l'évidence qu'une multitude d'impacts directs et indirects des changements climatiques pourraient toucher nos forêts et qu'on peine à quantifier l'ampleur et l'intensité de chacun, et par conséquent à prioriser ces menaces. Dans ce contexte d'incertitude, miser sur la diversité des mécanismes que les plantes ont déjà développés depuis des millions d'années pour affronter les stress les plus divers reste notre meilleure option, puisque que la rapidité des changements ne laissera pas le temps à de nouvelles adaptations de nature évolutives à se mettre en place.

La recherche de diversité recommandée passe notamment par une composition diversifiée au sein des peuplements. On vise les trois objectifs principaux suivants :

- Éviter que tous les arbres d'une forêt soient affectés par les mêmes stress, les mêmes ravageurs ou maladies (ce qui risquerait d'être le cas pour les arbres d'une même espèce ou d'espèces apparentées).
- Éviter que tous les arbres d'une forêt aient exactement les mêmes besoins (ce qui augmenterait la compétition pour les ressources).
- Se prémunir contre l'importante incertitude et la méconnaissance des effets combinés et indirects qu'auront les changements climatiques et qui pourraient faire en sorte que les principales menaces ne viennent pas d'où on les attend.

La recherche de diversité forestière prend plusieurs formes, dont les 3 suivantes, qui ont chacune leur importance.



### Diversifier la composition

La recherche de la diversité en espèces d'arbres est la première à laquelle on pense. Effectivement, c'est sans doute la plus importante puisque l'architecture et l'écologie des espèces d'arbres jouent un rôle majeur pour définir la structure et la dynamique écologique d'un écosystème forestier. Différentes façons d'évaluer la diversité spécifique sont présentées à l'**annexe 10**.

### Diversifier la structure

Diversifier la structure des peuplements, c'est favoriser la présence d'arbres de tous les âges et hauteurs (semis bas, semis hauts, gaules, perches, arbres codominants, arbres dominants). Elle permet d'assurer une relève à chaque étape. De plus, les différents stades de développement des arbres, y compris au sein d'une même espèce, n'ont pas la même vulnérabilité aux stress. Ainsi, la présence d'individus de tous les âges maximiserait les chances que certains survivent à des événements climatiques catastrophiques, permettant que la forêt se maintienne ou sinon, qu'elle se rétablisse rapidement par la suite.

### Diversifier la forêt à l'échelle du paysage

La structure du paysage ainsi que les caractéristiques des forêts qui entourent un peuplement forestier (leur composition, leur âge, leur structure) jouent également un rôle sur la vulnérabilité du peuplement. Elles contribuent à déterminer les semences qui sont présentes dans le sol, l'attractivité du secteur pour les insectes ravageurs, les risques de colonisation par des plantes envahissantes et la fréquentation du peuplement par des espèces fauniques, tant celle des brouteurs que des prédateurs.

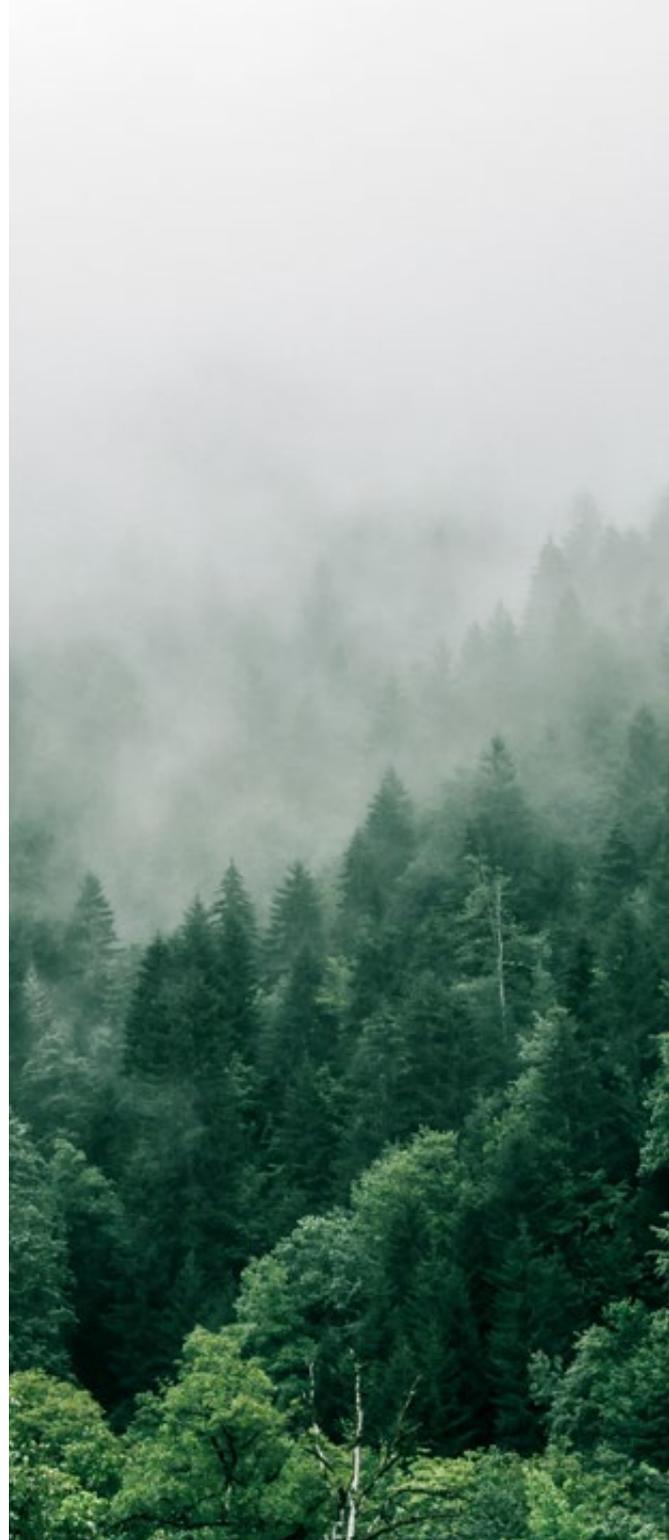
# Conclusion

**Ce guide tente de dresser quelques grandes lignes du portrait des effets des changements climatiques sur les forêts montréalaises. Il espère orienter le travail des intervenants forestiers afin qu'ils intègrent ces nouveaux enjeux à leurs décisions et qu'ils dirigent le développement des forêts de façon à les prémunir au mieux contre quelques menaces connues.**

Plusieurs enjeux forestiers se dessinent en Montérégie en lien avec les changements climatiques. Ils incluent l'augmentation de la fréquence des épisodes, durant lesquels, l'été, l'approvisionnement en eau des sols devient insuffisant en forêt, ainsi que les répercussions de ces épisodes sur la santé et la survie des arbres. De plus, les problèmes d'établissement et de survie de la régénération forestière naturelle risquent d'être accentués par ces sols secs, ainsi que par l'augmentation du broutement attendu suite à une recrudescence des densités de cerfs, à cause des hivers cléments. Les dommages et la mortalité d'arbres causés par les épidémies d'insectes ravageurs risquent aussi de s'accroître, d'une part à cause de la baisse du contrôle exercé historiquement par nos températures froides sur leurs populations, mais aussi à cause de la fragilité des arbres induite par le stress hydrique. Enfin, l'augmentation des températures hivernales, les fréquents gels-dégels et le couvert de neige réduit feront en sorte qu'on sera plus souvent confrontés à des sols forestiers fragiles, incapables de soutenir la machinerie forestière nécessaire aux travaux sylvicoles.

La liste des enjeux mentionnés dans ce document est cependant loin de se prétendre exhaustive. Les interactions entre les composantes des écosystèmes forestiers sont si multiples, complexes et mal connues qu'on ne peut prévoir toutes les réactions en chaîne qui résulteront des changements attendus. Il est surtout impossible de prédire lesquels auront le plus d'incidence sur une forêt donnée.

Les conseillers et propriétaires forestiers seront emmenés à jouer un rôle important pour l'adaptation des forêts. La connaissance d'une partie des menaces et des risques pourra influencer leurs choix d'objectifs d'aménagements et de travaux sylvicoles. Malgré la responsabilité qui leur reviendra de développer des solutions et des façons de faire innovatrices, ils devront rester conscients que persiste une incertitude substantielle sur la nature et l'ampleur des menaces auxquelles feront face les forêts. À la manière d'un financier qui a intérêt à diversifier les investissements de son portefeuille en période d'incertitude économique, un conseiller forestier devra lui aussi éviter de mettre tous ses œufs dans le même panier et travailler à favoriser la diversité de la forêt.



# Glossaire

Plusieurs termes utilisés dans ce document peuvent avoir des significations qui varient selon les contextes. Ce glossaire présente les sens retenus dans ce document par ses auteurs.

**Capacité d'adaptation** : Capacité d'un arbre, d'une espèce ou d'une forêt de changer quelque chose dans sa forme ou son fonctionnement, de façon à être moins affecté par un stress.

**Capacité d'éviter la sécheresse** : Capacité d'un arbre ou d'une espèce de continuer d'accéder à l'eau durant les périodes sèches grâce à des racines profondes.

**Cavitation** : Synonyme d'*embolie*.

**Crue** : Élévation du niveau d'un cours d'eau, résultant de la fonte des neiges ou de pluies abondantes (notamment au printemps).

**District écologique** : Unité de base de la classification écologique du territoire québécois de l'ordre de cent kilomètres carrés, caractérisé par une configuration spatiale propre du relief, de la géologie, de la géomorphologie et de la végétation.

**Diversité spécifique** : Indicateur de biodiversité qui s'intéresse à la diversité de la composition en espèces.

**Diversité fonctionnelle** : Évaluation de la diversité spécifique qui prend en compte la représentation de différents groupes d'espèces, formés sur la base des traits fonctionnels des espèces.

**Embolie** : Arrêt de la circulation de l'eau dans les vaisseaux de transport de la sève brute des plantes, causé par une entrée d'air dans le circuit, souvent provoqué par un manque d'eau dans le sol, les étés secs ou la multiplication des gels-dégels durant l'hiver. (Synonyme : cavitation).

**Étiage** : Baisse périodique du niveau de l'eau d'un cours d'eau ; son niveau d'eau le plus bas (l'été).

**Évapotranspiration** : Processus biophysique de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

**Indice de Shannon** : Indice de diversité spécifique évaluant le *nombre effectif d'espèces*.

**Indice d'humidité climatique (IHC)** : Différence entre la quantité d'eau issue des précipitations annuelles et la perte potentielle d'eau par évapotranspiration, dans les sols végétalisés (angl. : Climatic moisture index - CMI)

**Indice d'humidité topographique (IHT)** : Potentiel d'accumulation d'eau d'un site en fonction de la pente et de l'accumulation évaluées grâce au modèle numérique de terrain issu du LiDAR (anglais : Topographic wetness index – TWI)

**Nombre effectif d'espèces** : Indicateur de biodiversité qui prend en compte à la fois la richesse spécifique et l'abondance relative des espèces.

**Précipitations** : Apport d'eau en provenance de l'atmosphère parvenant au sol sous forme liquide (pluie) ou solide (neige, grêle, etc.)

**Résistance** : Capacité d'un écosystème, d'une espèce ou d'un individu de continuer à fonctionner malgré le stress qui lui est imposé, sa capacité de se maintenir dans son état initial.

**Résilience** : Capacité d'un écosystème, d'une espèce ou d'un individu de retrouver un fonctionnement ou un développement normal après avoir été affecté par un stress ou une perturbation.

**Richesse spécifique** : Indicateur de biodiversité qui prend en compte seulement le nombre d'espèces différentes représentées.

**Sensibilité** : Propension d'une espèce ou d'un individu à être affecté par un stress, largement déterminée par l'efficacité des stratégies adoptées par son espèce. (Anthonyme : tolérance).

**Sécheresse** : Déficit de précipitation sur une période prolongée entraînant une pénurie d'eau ayant des effets néfastes sur la flore, la faune et la population. Aussi utilisé pour « manque d'eau » au sens large.

**Stomates** : Petits trous à la surface des feuilles des plantes permettant ses échanges gazeux avec l'air ambiant, son évapotranspiration et la régulation de sa pression osmotique.

**Stress hydrique** : Situation d'une plante ou d'un arbre qui souffre d'un apport d'eau insuffisant sur une certaine période et entraînant l'adoption de stratégies d'économie d'eau.

**Traits fonctionnels** : Caractéristiques biologiques (structurales, morphologiques) permettant à un organisme de fonctionner (survivre, croître) dans une niche écologique.

**Vulnérabilité** : Propension d'un écosystème, d'une espèce ou d'un individu à être affecté négativement par un stress (résultant de sa sensibilité, son exposition et de sa capacité d'adaptation).

# Références

- Anneco C., A. Guay-Picard, ... 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.
- Belluau, M. et A. Paquette. 2021.** *Guide pour la diversité des forêts de la Montérégie. Analyse de la diversité et recommandation de plantation et de conservation pour les intervenants forestiers.* Université du Québec à Montréal. 23 p. + annexes.
- Boisvert-Marsh, L., S. Royer-Tardif, P. Nolet, F. Doyon & 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(9), 989.
- Cusson, M. et J.-F. Pépin. 2015.** *Modèle d'utilisation d'habitat du cerf dans le sud du Québec.* Agence forestière de la Montérégie. 69 pages + annexes.
- CDAQ. 2021.** *Plan d'adaptation de l'agriculture de la Montérégie aux changements climatiques.* Projet Agriculmat. 44 p. ISBN 978-29819521-7-2
- Ellison, A.M., M. S. Bank, ... and J.R. Webster. 2005.** *Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems.* *Frontiers in Ecology and the Environment* 3: 479-486
- Glick, P., B.A. Stein, and N.A. Edelson, editors. 2011.** *Scanning the Conservation Horizon: A Guide to Climate Change Vulnerability Assessment.* National Wildlife Federation, Washington, D.C.
- 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. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportSecheresseForet.pdf>
- Logan, T., I. Charron, D. Chaumont et D. Houle. 2011.** *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise.* OURANOS et la Direction de la Recherche forestière du MFFP, Québec. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/AtlasOuranos.pdf>
- McKenney, D. W., M. F. Hutchinson, P. Papadopol, ... T. Owen. 2011.** *Customized spatial climate models for North America.* *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), 1611-1622
- Ministry of Agriculture of British Columbia. 2015.** Water Conservation Factsheet no 619.000.
- Ouranos [site Web]. Consulté le 18 octobre 2021.** <https://portclim.ouranos.ca/#/regions/27>
- Périé, C., S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus. 2014.** *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec.* Gouvernement du Québec, ministère des Ressources Naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière no 173. 46 p.
- Ressources naturelles Canada [site Web].** *Indice d'humidité climatique au Canada.* Consulté le 2 septembre 2022. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/de1704c8-ba69-4e66-ac4b-13b966e2eedf>
- Royer-Tardif, S.; Bauhus, J.; Doyon, F.; Nolet, P.; Thiffault, N.; Aubin, I. 2021.** *Revisiting the Functional Zoning Concept under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options.* *Forests* 2021, 12, 273.
- Ruel, J.-C. 2000.** *La sylviculture face au risque de chablis - Mise à jour - Formation continue de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec.* Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval. 26 p.
- 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
- Sylvain J.-D., Anctil F., Thiffault E. 2021.** *Using ensemble modelling and bias correction for predictive mapping and related uncertainty: a case study in digital soil mapping.* *Geoderma*, Vol. 403, 1 Dec. 2021, 115153.
- Thiffault, N, P. Raymond ... et A. Malenfant. 2021.** *Sylviculture d'adaptation aux changements climatiques : des concepts à la réalité.* Compte-rendu d'un colloque du Carrefour Forêts 2019. *Forestry Chronicle-* Vol. 97(01)
- USDA. 2020.** *Climate change Ressources Center – Managing For Change – Adaptation strategies - US Forest Services –* <https://www.fs.usda.gov/ccrc/education/managing-change>.
- USDA. 2018.** *New England and northern New York forest ecosystem vulnerability assessment and synthesis: a report from the New England Climate Change Response Framework project.* Gen. Tech. Rep. NRS-173. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 234 p

# Annexes

## Liste des annexes

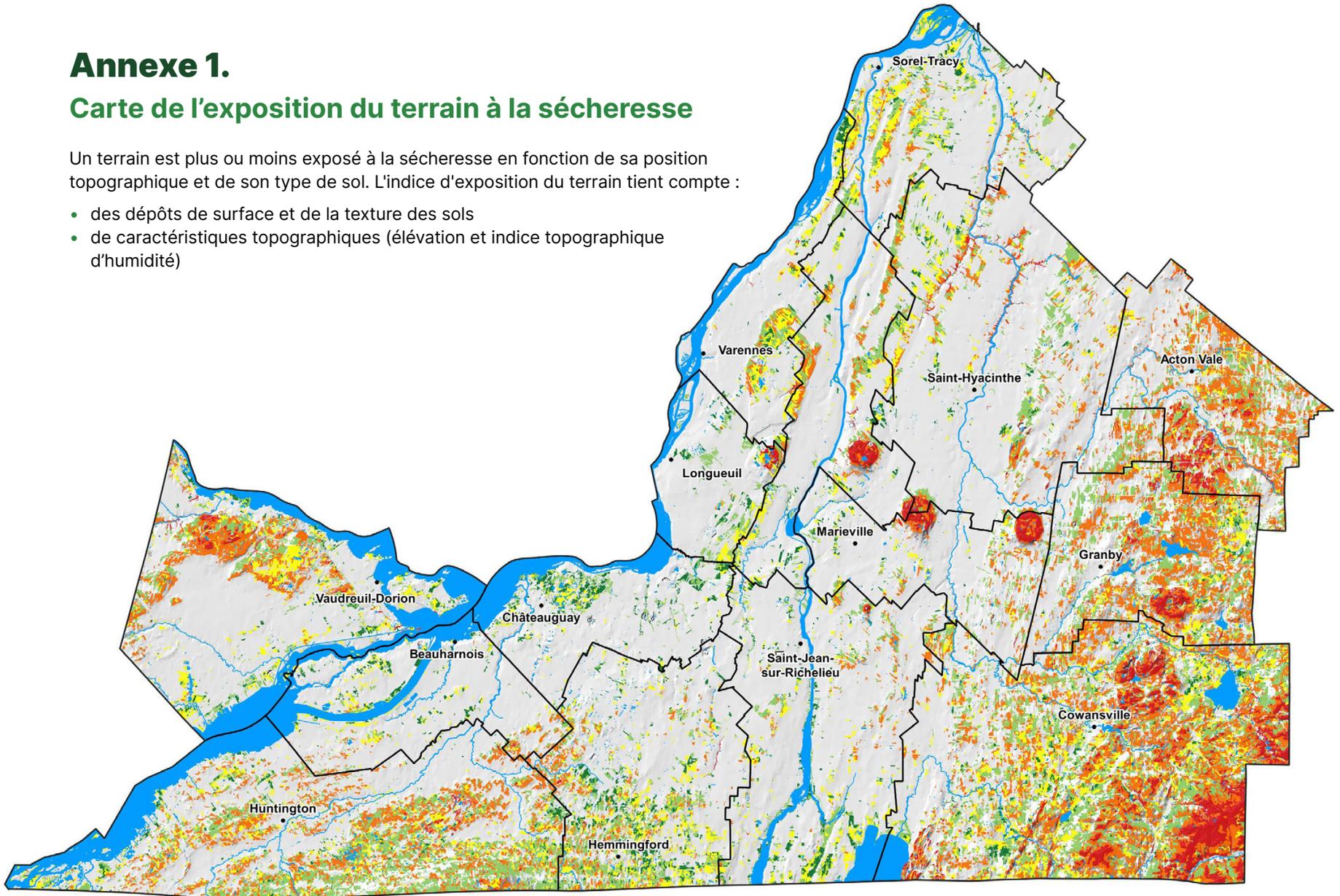
Annexe 1. Carte de l'exposition du terrain à la sécheresse .....	40
Annexe 2. Carte de l'exposition au climat favorisant la sécheresse .....	41
Annexe 3. Carte de la sensibilité des espèces à la sécheresse .....	42
Annexe 4. Carte de la capacité d'adaptation du paysage à la sécheresse .....	43
Annexe 5. Carte des risques d'impacts par la sécheresse .....	44
Annexe 6. Carte du risque de déclin prématuré .....	45
Annexe 7. Détails et sources des données ayant servi au calcul des indices retenus. ....	46
Annexe 8. Carte des densités hivernales de cerfs .....	47
Annexe 9. Tableau de tolérance à la sécheresse des espèces .....	48
Annexe 10. Évaluer la diversité spécifique .....	50

# Annexe 1.

## Carte de l'exposition du terrain à la sécheresse

Un terrain est plus ou moins exposé à la sécheresse en fonction de sa position topographique et de son type de sol. L'indice d'exposition du terrain tient compte :

- des dépôts de surface et de la texture des sols
- de caractéristiques topographiques (élévation et indice topographique d'humidité)



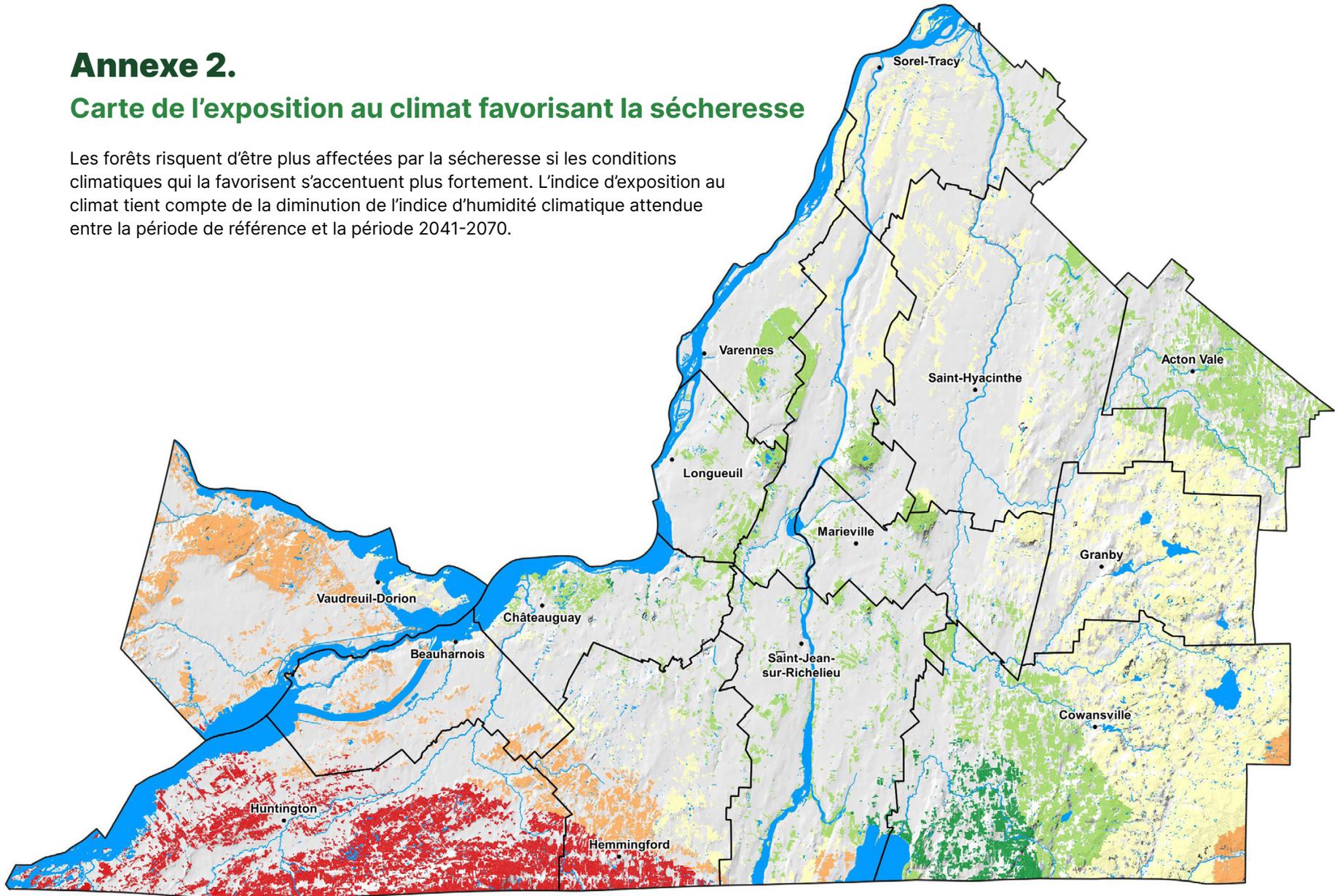
Exposition du terrain des peuplements forestiers de la Montérégie à la sécheresse sur la base de leur topographie et de leurs sols.

Plus exposé  Moins exposé

## Annexe 2.

### Carte de l'exposition au climat favorisant la sécheresse

Les forêts risquent d'être plus affectées par la sécheresse si les conditions climatiques qui la favorisent s'accroissent plus fortement. L'indice d'exposition au climat tient compte de la diminution de l'indice d'humidité climatique attendue entre la période de référence et la période 2041-2070.



**Exposition des peuplements forestiers de la Montérégie à la progression des conditions climatiques favorisant la sécheresse** (variation de l'indice d'humidité climatique entre la période de référence et la période 2041-2070).

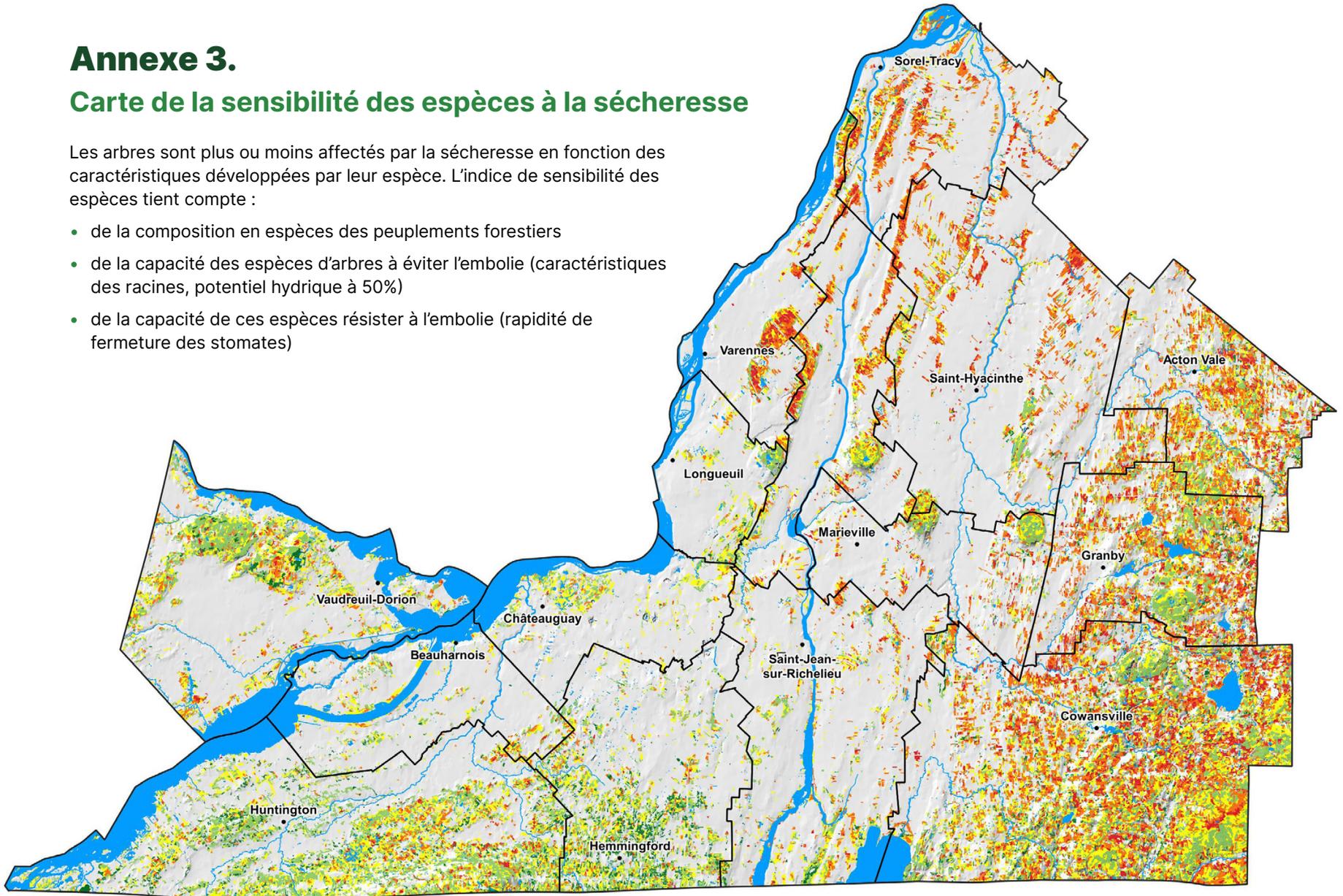
Plus exposé ■ ■ ■ ■ ■ Moins exposé

## Annexe 3.

### Carte de la sensibilité des espèces à la sécheresse

Les arbres sont plus ou moins affectés par la sécheresse en fonction des caractéristiques développées par leur espèce. L'indice de sensibilité des espèces tient compte :

- de la composition en espèces des peuplements forestiers
- de la capacité des espèces d'arbres à éviter l'embolie (caractéristiques des racines, potentiel hydrique à 50%)
- de la capacité de ces espèces résister à l'embolie (rapidité de fermeture des stomates)



Sensibilité à la sécheresse des peuplements forestiers de la Montérégie, sur la base de celle des espèces d'arbres qui les composent.

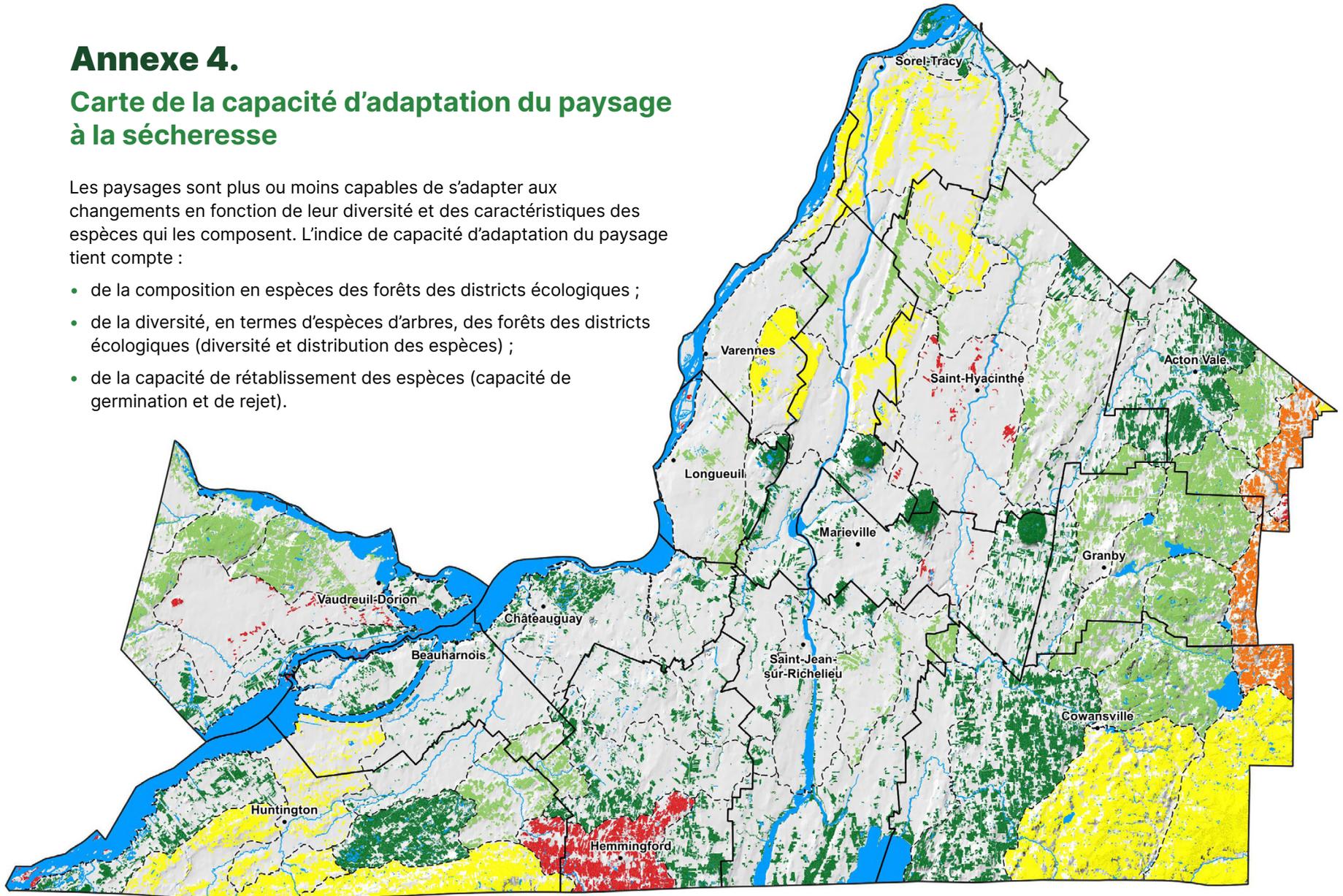
Plus sensible  Moins sensible

## Annexe 4.

### Carte de la capacité d'adaptation du paysage à la sécheresse

Les paysages sont plus ou moins capables de s'adapter aux changements en fonction de leur diversité et des caractéristiques des espèces qui les composent. L'indice de capacité d'adaptation du paysage tient compte :

- de la composition en espèces des forêts des districts écologiques ;
- de la diversité, en termes d'espèces d'arbres, des forêts des districts écologiques (diversité et distribution des espèces) ;
- de la capacité de rétablissement des espèces (capacité de germination et de rejet).



**Capacité d'adaptation à la sécheresse des forêts des districts écologiques de la Montérégie**, basée sur leur diversité spécifique et la capacité de rétablissement des espèces qui les composent.

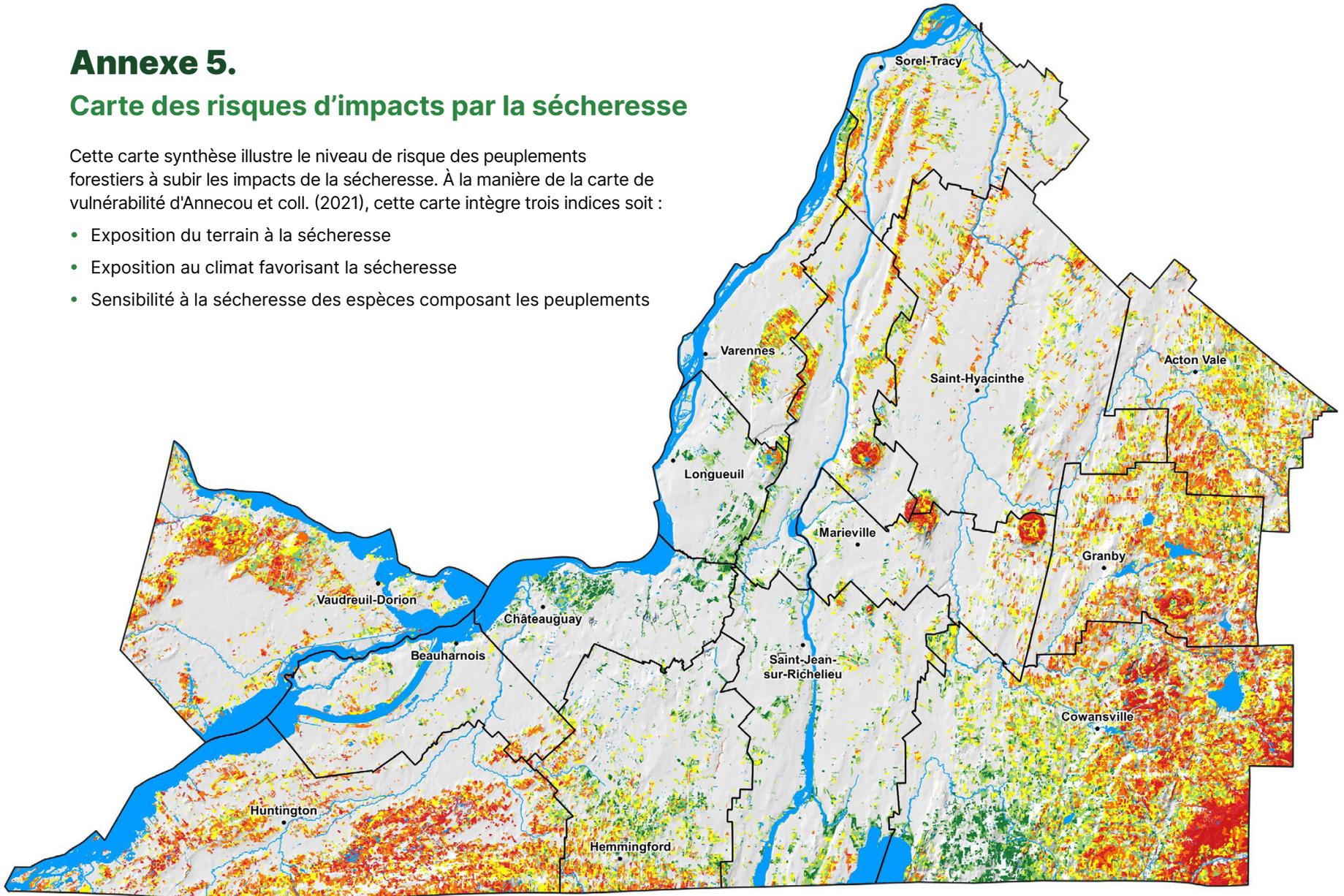
Moins adapté  Plus adapté

## Annexe 5.

### Carte des risques d'impacts par la sécheresse

Cette carte synthèse illustre le niveau de risque des peuplements forestiers à subir les impacts de la sécheresse. À la manière de la carte de vulnérabilité d'Anneccou et coll. (2021), cette carte intègre trois indices soit :

- Exposition du terrain à la sécheresse
- Exposition au climat favorisant la sécheresse
- Sensibilité à la sécheresse des espèces composant les peuplements



**Niveau de risque des peuplements forestiers de la Montérégie face aux impacts de la sécheresse** (Intègre 3 indices liés à la sécheresse : exposition du terrain, exposition au climat, sensibilité des espèces)

Plus à risque  Moins à risque

## Annexe 6.

### Carte du risque de déclin prématuré

La combinaison des quatre indices permet de s'intéresser à l'avenir à plus long terme de ces peuplements forestiers puisqu'il considère également leur capacité de se rétablir. Cette carte synthèse présente le risque relatif des peuplements forestiers de la Montérégie à subir un déclin prématuré en raison de la sécheresse. Tel que proposé par Anneco et coll. (2021), en incluant les quatre indices suivants :

- exposition du terrain à la sécheresse,
- exposition au climat favorisant la sécheresse
- sensibilité à la sécheresse des espèces des peuplements
- capacité d'adaptation des espèces du paysage à la sécheresse



**Risque que la sécheresse inflige un déclin prématuré aux peuplements forestiers de la Montérégie.** (Intègre les 4 indices liés à la sécheresse : exposition du terrain, exposition au climat, sensibilité des espèces, capacité d'adaptation)

Plus à risque ■ ■ ■ ■ Moins à risque

## Annexe 7.

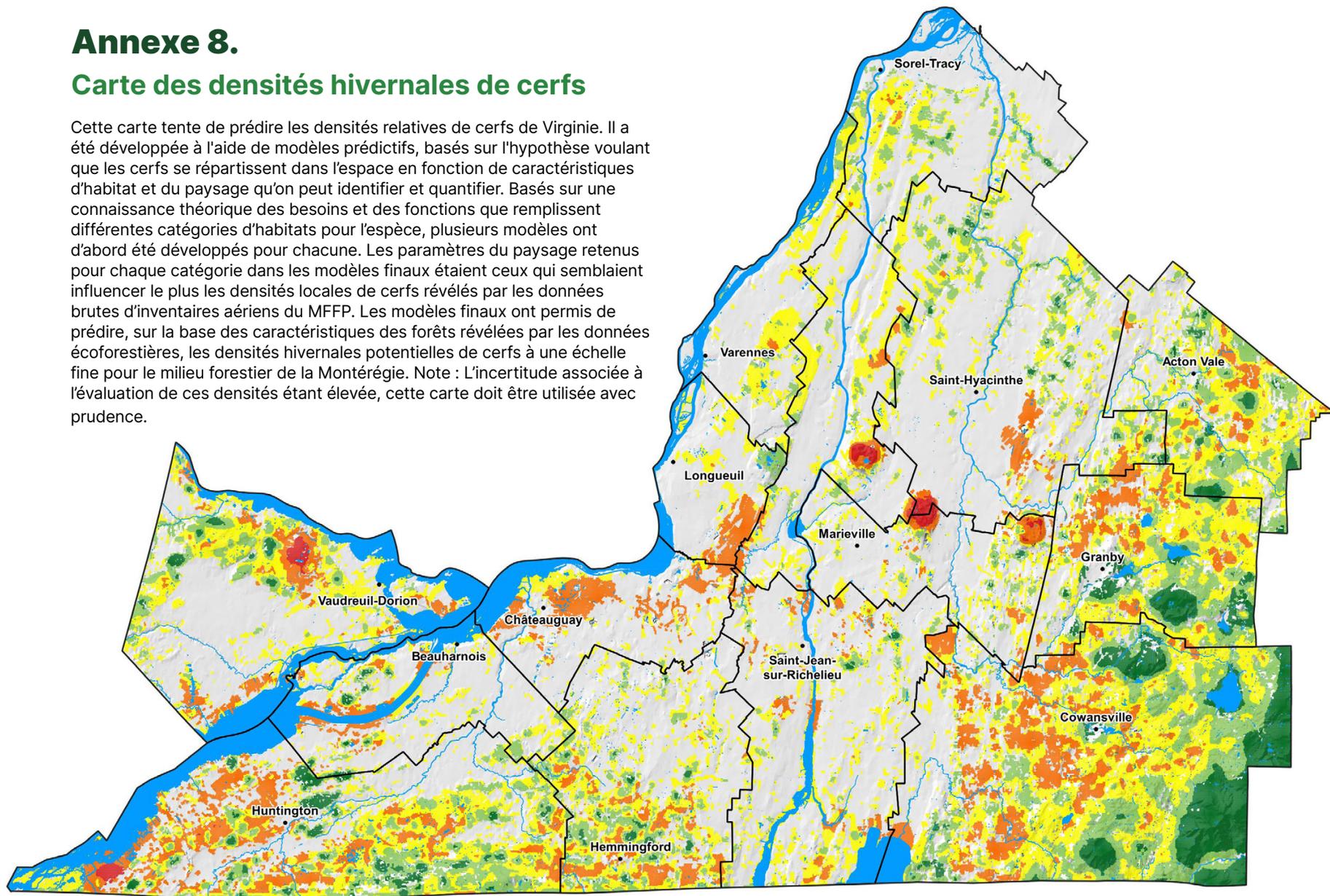
### Détails et sources des données pour le calcul des indices.

Indices	Indicateurs	Données	Variables	Sources des données	Détails géomatiques
<b>Exposition du terrain</b> à la sécheresse	Caractéristiques des sols	Dépôt de surface	Sols minces et très minces	<a href="http://www.donneesquebec.ca">www.donneesquebec.ca</a>	Isolement des dépôts R1A+M1A+R existants sur le territoire
		Classe texturale	Catégorie 30-60 cm de profondeur	Sylvain et coll. Under review	Résolution originale de 250 m x 250 m
	Capacité de rétention de l'eau dans le sol ( <i>Available water storage capacity - AWSC</i> )		Ministry of Agriculture of British Columbia. 2015		
	Caractéristiques topographiques	Modèle numérique de terrain (MNT)	Élévation		<a href="http://www.foretouverte.gouv.qc.ca">www.foretouverte.gouv.qc.ca</a>
Indice topographique d'humidité (ITH) ( <i>Topographic Wetness Index - TWI</i> )				Sorensen et coll. 2006.	Outils SAGA QGIS TWI
<b>Exposition au climat</b> favorisant la sécheresse	Indice d'humidité climatique (IHC) ( <i>Climate Moisture Index - CMI</i> )	Différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle	Écart entre l'IHC des périodes 1971-2000 et 2041-2070 (RCP 8,5)	McKenney et coll. 2011	Résolution originale de 10 km x 10 km
<b>Sensibilité des espèces</b> à la sécheresse	Capacité des espèces à éviter l'embolie	Profondeur et architecture des racines	Valeurs d'évitement et de résistance à l'embolie basées sur classement relatif de 24 espèces forestières de l'Est du Canada	Boisvert-Marsh et coll. 2020.	Données dendrométriques du 4 <sup>e</sup> inventaire. Volume/ha/espèces pondérées par peuplement.
	Résistance des espèces à l'embolie	Potentiel hydrique à 50 %			
<b>Capacité d'adaptation</b> des forêts du paysages	Diversité spécifique	Diversité par district écologique	Indice de Shannon		Outils ARCGIS SDw
		Distribution spatiale des espèces dans districts écologiques	Distance standard		Données dendrométriques du 4 <sup>e</sup> inventaire. Volume/ha/espèces pondéré par district.
	Capacité de rétablissement des espèces	Capacité de rejet des sp. Capacité germination des sp.	Valeurs de rétablissement basées sur classement relatif de 24 espèces forestières de l'Est du Canada	Boisvert-Marsh et coll. 2020.	Données dendrométriques du 4 <sup>e</sup> inventaire. Tiges/ha/espèces pondéré par district écologique

## Annexe 8.

### Carte des densités hivernales de cerfs

Cette carte tente de prédire les densités relatives de cerfs de Virginie. Il a été développée à l'aide de modèles prédictifs, basés sur l'hypothèse voulant que les cerfs se répartissent dans l'espace en fonction de caractéristiques d'habitat et du paysage qu'on peut identifier et quantifier. Basés sur une connaissance théorique des besoins et des fonctions que remplissent différentes catégories d'habitats pour l'espèce, plusieurs modèles ont d'abord été développés pour chacune. Les paramètres du paysage retenus pour chaque catégorie dans les modèles finaux étaient ceux qui semblaient influencer le plus les densités locales de cerfs révélés par les données brutes d'inventaires aériens du MFFP. Les modèles finaux ont permis de prédire, sur la base des caractéristiques des forêts révélées par les données écoforestières, les densités hivernales potentielles de cerfs à une échelle fine pour le milieu forestier de la Montérégie. Note : L'incertitude associée à l'évaluation de ces densités étant élevée, cette carte doit être utilisée avec prudence.



**Carte prédisant les densités relatives de cerfs durant l'hiver dans les milieux forestiers de la Montérégie** sur la base des caractéristiques des peuplements forestiers et de modèles d'habitats.

Densités les plus fortes  Densités les plus faibles

Source : Cusson et Pépin. 2015

## Annexe 9.

### Tolérance à la sécheresse des espèces

Le tableau suivant présente des valeurs relatives de capacité d'éviter la sécheresse et de résistance à la sécheresse d'espèces d'arbres, basées sur la compilation de données issues de multiples projets de recherches à l'issue d'une revue de littérature par Boisvert-Marsh et coll. (2020) et du classement des espèces.

- La « **capacité d'éviter la sécheresse** » tente de décrire l'efficacité de l'espèce à aller puiser de l'eau en profondeur. Sa valeur est basée sur la profondeur de ses racines et de son type de réseau racinaire.
- La « **résistance à la sécheresse** » tente de décrire l'efficacité de l'espèce à réagir au manque d'eau afin de ne pas être affecté par celui-ci. La valeur tient compte de l'efficacité de l'espèce, en période sèche, à résister à l'embolie, à fermer ses stomates, à allonger ses racines, etc.
- La « **tolérance à la sécheresse** » de l'espèce est l'inverse de sa sensibilité. La valeur présentée ici résulte de la simple combinaison des valeurs de capacité d'évitement et de résistance de l'espèce. On invite à utiliser cette valeur de tolérance avec une certaine prudence puisque, en réalité, on connaît mal l'importance relative de l'une et l'autre de ces composantes, ainsi que l'effet de leur interaction, sur la capacité d'une espèce à survivre à la sécheresse.

Noms de l'espèce		Capacité d'éviter la sécheresse (E)	Résistance à la sécheresse (R)	Tolérance à la sécheresse (E+R)
<b>Sapin Baumier</b>	<i>Abies balsamea</i>	+ / -	-	-
<b>Érable noir</b>	<i>Acer nigrum</i>	+ / -	+	+
<b>Érable rouge</b>	<i>Acer rubrum</i>	+ / -	-	-
<b>Érable argenté</b>	<i>Acer saccharinum</i>	+ / -	+	+
<b>Érable à sucre</b>	<i>Acer saccharum</i>	+ / -	+ / -	+ / -
<b>Aulne rugueux</b>	<i>Alnus incana</i>	-	--	--
<b>Bouleau jaune</b>	<i>Betula alleghaniensis</i>	-	--	--
<b>Bouleau à papier</b>	<i>Betula papyrifera</i>	-	--	--
<b>Bouleaux gris</b>	<i>Betula populifolia</i>	-	+ / -	-
<b>Caryer cordiforme</b>	<i>Carya cordiformis</i>	+	--	-
<b>Caryer à fruits doux</b>	<i>Carya ovata</i>	+	--	-
<b>Micocoulier occidental</b>	<i>Celtis occidentalis</i>	++	+ / -	++
<b>Hêtre à grandes feuilles</b>	<i>Fagus grandifolia</i>	+ / -	-	-
<b>Frêne blanc</b>	<i>Fraxinus americana</i>	+	--	-
<b>Frêne noir</b>	<i>Fraxinus nigra</i>	-	--	--
<b>Frêne rouge</b>	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	++	-	+
<b>Noyer cendré</b>	<i>Juglans cinerea</i>	++	--	-

-- = Sensible / très sensible  
- = Moyennement sensible

+ / - = Intermédiaire

+ = Moyennement tolérant  
++ = Tolérant / très tolérant

## ANNEXES 9. - TOLÉRANCE À LA SÉCHERESSE DES ESPÈCES

Noms de l'espèce		Capacité d'éviter la sécheresse (E)	Résistance à la sécheresse (R)	Tolérance à la sécheresse (E+R)
<b>Noyer noir</b>	<i>Juglans nigra</i>	++	-	+
<b>Mélèze laricin</b>	<i>Larix laricina</i>	-	+	+ / -
<b>Tulipier de Virginie</b>	<i>Liriodendron tulipifera</i>	+	+	++
<b>Ostryer de Virginie</b>	<i>Ostrya virginiana</i>	+ / -	+ / -	+ / -
<b>Épinette de Norvège</b>	<i>Picea abies</i>	-	+ / -	-
<b>Épinette blanche</b>	<i>Picea glauca</i>	+ / -	++	++
<b>Épinette noire</b>	<i>Picea mariana</i>	--	++	+ / -
<b>Épinette rouge</b>	<i>Picea rubens</i>	--	+	-
<b>Pin gris</b>	<i>Pinus banksiana</i>	++	+	++
<b>Pin rouge</b>	<i>Pinus resinosa</i>	++	+ / -	++
<b>Pin rigide</b>	<i>Pinus rigida</i>	++	+	++
<b>Pin blanc</b>	<i>Pinus strobus</i>	++	-	+
<b>Pin sylvestre</b>	<i>Pinus sylvestris</i>	+	+	++
<b>Peuplier baumier</b>	<i>Populus balsamifera</i>	+ / -	--	--
<b>Peuplier deltoïde</b>	<i>Populus deltoides</i>	++	-	+
<b>Peuplier à grandes dents</b>	<i>Populus grandidentata</i>	+ / -	--	--
<b>Peupliers hybrides</b>	<i>Populus sp. (hybrides)</i>	+	--	-
<b>Peuplier faux-tremble</b>	<i>Populus tremuloides</i>	+ / -	--	--
<b>Cerisier de Pennsylvanie</b>	<i>Prunus pensylvanica</i>	--	++	+ / -
<b>Cerisier tardif</b>	<i>Prunus serotina</i>	-	++	+
<b>Chêne blanc</b>	<i>Quercus alba</i>	+	+ / -	+
<b>Chêne bicolor</b>	<i>Quercus bicolor</i>	-	+ / -	-
<b>Chêne à gros fruits</b>	<i>Quercus macrocarpa</i>	++	+ / -	++
<b>Chêne rouge</b>	<i>Quercus rubra</i>	++	+	++
<b>Robinier faux-accacia</b>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	++	+ / -	++
<b>Saule noir</b>	<i>Salix nigra</i>	+ / -	--	--
<b>Sassafras officinal</b>	<i>Sassafras albidum</i>	--	-	--
<b>Thuja occidental</b>	<i>Thuja occidentalis</i>	+ / -	+ / -	+ / -
<b>Tilleul d'Amérique</b>	<i>Tilia americana</i>	+ / -	-	-
<b>Pruche de l'est</b>	<i>Tsuga canadensis</i>	-	-	--
<b>Orme d'Amérique</b>	<i>Ulmus americana</i>	+ / -	--	--
<b>Orme rouge</b>	<i>Ulmus rubra</i>	+ / -	--	--
<b>Orme liège</b>	<i>Ulmus thomasii</i>	+	--	--

-- = Sensible / très sensible  
- = Moyennement sensible

+ / - = Intermédiaire

+ = Moyennement tolérant  
++ = Tolérant / très tolérant

## Annexe 10.

### Évaluer la diversité spécifique

#### *Richesse spécifique*

Pour évaluer la diversité spécifique d'un peuplement forestier, on pense d'abord à compter le nombre d'espèces différentes qui le composent. C'est ce qu'on appelle la richesse spécifique. Cette méthode a l'inconvénient de considérer également les espèces qui sont fortement représentées dans le peuplement et celles qui y sont tout à fait marginales et, ainsi, de donner une importance démesurée à ces dernières par rapport au rôle, vraisemblablement petit, qu'elles peuvent jouer dans le peuplement vu leur petit nombre.

#### *Nombre effectif d'espèces*

Le nombre effectif d'espèces, pour sa part, tient compte non seulement du nombre d'espèces présentes, mais aussi de l'abondance relative de chacune. L'indice de Shannon et celui de Simpson font partie de cette catégorie.

Le calcul du nombre effectif d'espèces ne tient pas compte du fait que certaines espèces, par exemple deux espèces du même genre, seraient moins complémentaires que ne le seraient deux espèces de genres différents. Pour corriger cela, il est possible de considérer la diversité des genres, en plus de considérer celle des espèces.



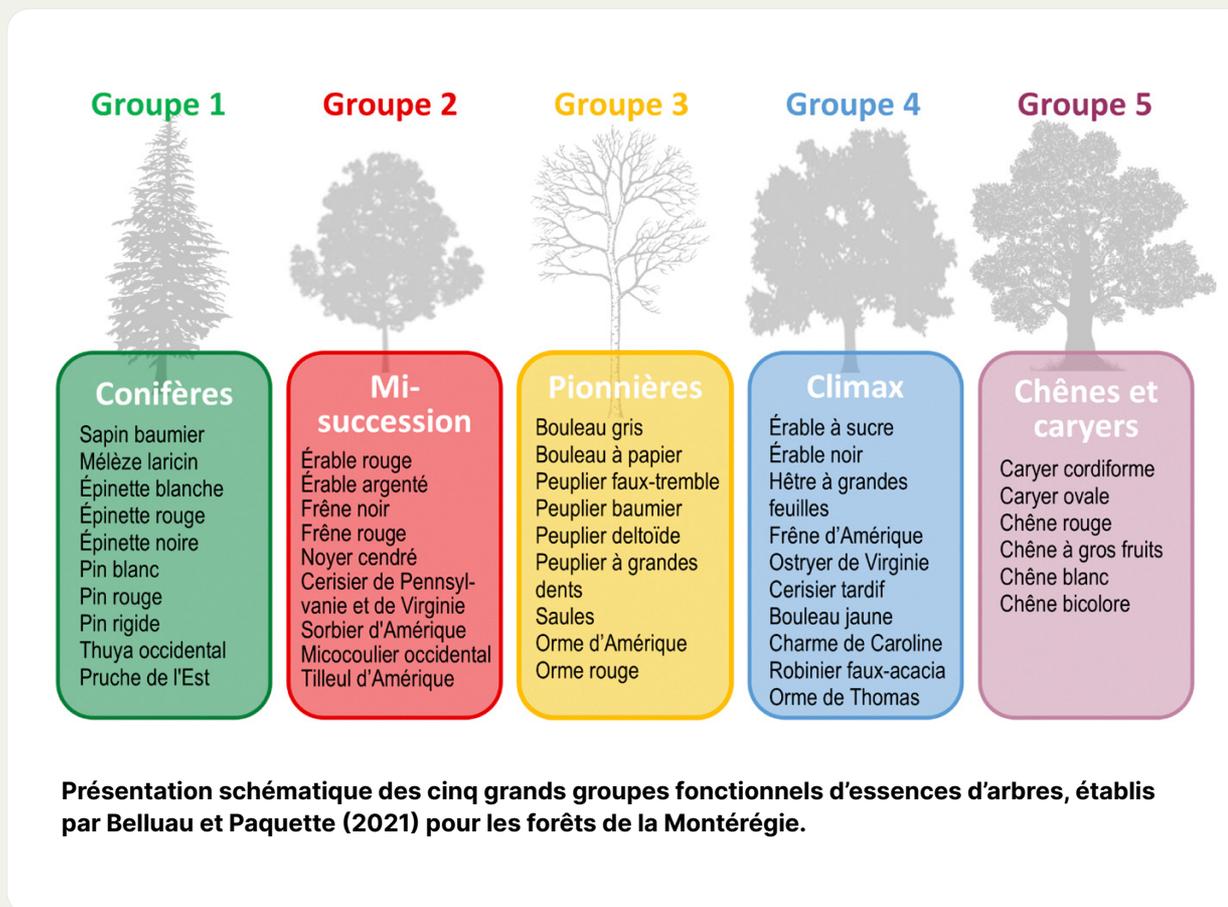


### Diversité fonctionnelle

La notion de diversité fonctionnelle a, pour sa part, été élaborée pour tenir compte du fait que deux essences, apparentées ou non, mais ayant développé des caractéristiques et des fonctions semblables, n'offriraient pas une complémentarité aussi bonne que deux essences dont les caractéristiques et le fonctionnement sont très différents.

Pour aider à appliquer cette notion à la forêt de la Montérégie, Belluau et Paquette (2021) ont regroupé les essences forestières de la région en 5 groupes sur la base de leurs traits fonctionnels. Ainsi, les espèces faisant partie d'un même groupe sont semblables, du point de vue fonctionnel.

Pour un peuplement donné, ils suggèrent d'évaluer la proportion des arbres dont les essences se retrouvent dans chacun de ces groupes fonctionnels et de favoriser le maintien ou l'établissement d'espèces issues des groupes moins représentés.





AGENCE FORESTIÈRE DE LA MONTÉRÉGIE