



# IMPACTS DE LA SÉCHERESSE

**SUR LE SECTEUR FORESTIER QUÉBÉCOIS  
DANS UN CLIMAT VARIABLE ET EN ÉVOLUTION**





550 Sherbrooke Ouest, Tour Ouest,  
19<sup>e</sup> étage, Montréal (Québec) H3A 1B9, Canada

Tél. : 514 282 6464 | Téléc. : 514 282 7131

**Écrit par :**

Geneviève Lajoie <sup>1</sup>

**En collaboration avec :**

Daniel Houle <sup>1,2</sup> et Anne Blondlot <sup>1</sup>

**Révisé par :**

Yves Bergeron <sup>3</sup>, Pierre Bernier <sup>4</sup>, Marc-André Boivin <sup>5</sup>,  
Michel Campagna <sup>2</sup>, Éric Domaine <sup>6</sup> et Jean-Pierre Jetté <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Ouranos, consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

<sup>2</sup> Direction de la recherche forestière, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP)

<sup>3</sup> Université du Québec à Montréal / Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

<sup>4</sup> Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

<sup>5</sup> Direction de la gestion des forêts Capitale-Nationale-Chaudière-Appalaches, MFFP

<sup>6</sup> Direction de l'aménagement et de l'environnement forestier, MFFP

Citation suggérée : 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.



**D**es terres arides et craquelées s'étendant à perte de vue, des lits de rivière à sec, des récoltes réduites en poussière : les événements de sécheresse ont de quoi frapper l'imaginaire, tant pour leurs impacts sur la santé humaine (ex : manque d'accès à l'eau potable) que sur la sécurité alimentaire. Des épisodes récents de sécheresse illustrent l'ampleur possible des impacts sur les populations humaines prises au dépourvu. La Californie est par exemple aux prises depuis 2011 avec la plus grande sécheresse enregistrée depuis les 120 dernières années, et les autorités visent à empêcher un effondrement de la production agricole de l'état par le rationnement de l'eau à la fois dans les milieux agricoles et urbains.

Quoique de telles manifestations puissent nous sembler exotiques, depuis une région reconnue pour l'abondance de ses ressources en eau, il demeure que les changements climatiques mèneront à une fréquence accrue d'épisodes de sécheresse pour l'ensemble du globe et le Québec n'y échappera pas. D'ailleurs, la population québécoise n'a pas été épargnée par des événements climatiques extrêmes ces dernières années. Souvenons-nous seulement de la chaleur et de l'aridité de l'été 2010, ayant causé des pénuries d'eau potable et favorisé la propagation incontrôlable de grands feux de forêts qui ont mené à l'évacuation de centaines de personnes.

## QU'EST-CE QUE LA SÉCHERESSE ?

La sécheresse se définit comme un déficit en précipitations s'étendant sur de longues périodes, et menant à une pénurie en eau pour un ou différents secteurs d'activités. Techniquement, elle peut être identifiée par un écart aux conditions historiques moyennes de précipitation et/ou de température menant à la diminution du contenu en eau des sols.

En plus d'une diminution des précipitations, une hausse de la température assèche les sols en augmentant à la fois leur évaporation de surface et la quantité d'eau qui leur est soutirée par les végétaux (ce qui correspond à l'évapotranspiration). Ainsi, une sécheresse pourrait survenir en réponse à une hausse de température prolongée sans une baisse notable des précipitations. Une diminution des réserves de neige accumulées à l'hiver et leur fonte plus hâtive peut également limiter la quantité d'eau disponible pour les arbres pour pallier aux stress climatiques de l'été<sup>51</sup>.

# IMPACTS DE LA SÉCHERESSE SUR LE CAPITAL FORESTIER

Outre les effets sur les populations et l'agriculture, la sécheresse menace également la santé des forêts. De plus en plus d'études font état d'épisodes de mortalité massive dans les forêts à travers le monde pour une gamme d'espèces économiquement importantes dont certaines ont rarement été confrontées à de tels événements climatiques (voir Figure 1). En diminuant les stocks de bois disponibles pour l'exploitation, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses pourrait ainsi avoir de fâcheuses conséquences pour le secteur forestier.

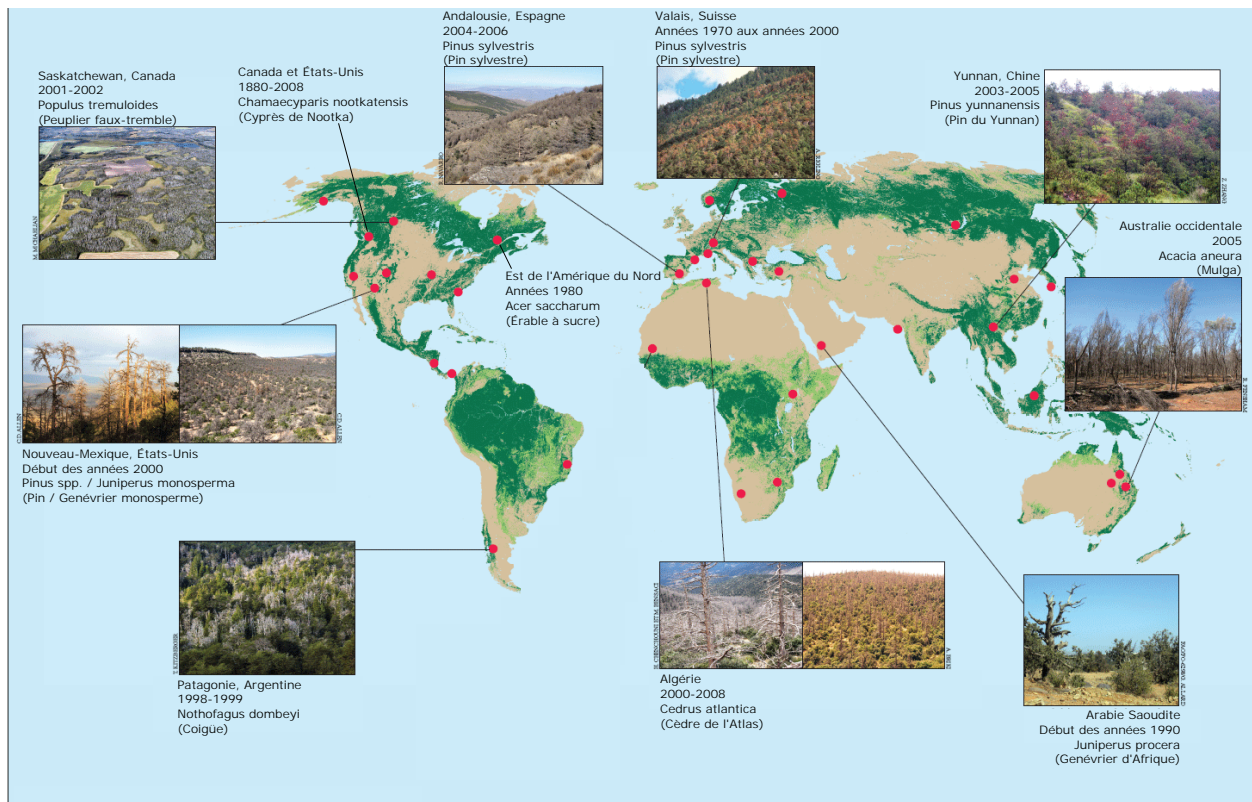


Figure 1. Lieux où une mortalité accrue des forêts liée à la sécheresse et aux températures élevées a été observée (adapté d'Allen, site web de la FAO <sup>1</sup>).

## DE LA MORTALITÉ DÉJÀ OBSERVÉE DANS LES FORÊTS CANADIENNES

Un coup d'œil sur les forêts canadiennes met en relief la vulnérabilité de nos ressources forestières à un assèchement des conditions climatiques. Une équipe de chercheurs de l'Université du Québec à Montréal a ainsi documenté une augmentation moyenne de la mortalité dans les forêts canadiennes non-aménagées de l'ordre de 4,7% entre 1963 et 2008. Celle-ci est attribuée principalement au stress hydrique lié à une hausse des températures augmentant l'évapotranspiration, et à une diminution des précipitations. Au Québec cependant, l'accroissement de la mortalité était moindre (1,9% par année) et les résultats étaient basés sur un très petit nombre d'observations<sup>2</sup>.

L'ampleur des événements de mortalité massive détectés récemment n'est guère plus rassurante. Des sécheresses sévères enregistrées dans l'ouest du pays en 2001 et 2002, de même que dans le nord-ouest des États-Unis entre 2009-2011, ont mené à des pertes de biomasse aérienne de l'ordre de 20% et 31% respectivement dans des forêts de tremble<sup>3,4</sup>. Parallèlement, un déclin inhabituel de la croissance de l'épinette noire a été enregistré à la fin du 20<sup>e</sup> siècle dans la forêt boréale de l'est de l'Amérique du Nord, en réponse à une hausse de température ayant mené à de plus grands besoins en eau<sup>5</sup>. Dans cette étude couvrant à la fois des classes d'âges matures et surmatures (de 70 ans à plus de 140 ans), ce sont 62% des arbres échantillonnés qui avaient subi un déclin de croissance entre 1970 et 1997.

### **DES IMPACTS ÉCONOMIQUES ATTENDUS**

À moyen terme, le déclin d'espèces forestières commerciales en réponse à la sécheresse aura un impact économique important. Selon une étude récente, la perte de valeur des terres forestières européennes pourrait atteindre de 14 à 50% sur un horizon de 100 ans, totalisant ainsi plusieurs centaines de milliards d'Euros, selon les scénarios climatiques étudiés<sup>6</sup>. Ces pertes seraient principalement dues à une diminution des superficies couvertes par l'épinette de Norvège, une espèce productive de haute valeur économique mal adaptée à la sécheresse<sup>7</sup>.

Dans un récent rapport de la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie<sup>8</sup>, des baisses de 1 à 2% du volume de bois d'œuvre d'ici 2050 ont été estimées pour le Québec en réponse aux changements climatiques en général, incluant les impacts d'une hausse de la fréquence des feux de forêt et d'épidémies d'insectes<sup>8</sup>. Les coûts des impacts envisagés, et plus particulièrement ceux liés à une hausse possible des sécheresses, restent encore à établir.

## **ÉVOLUTION CLIMATIQUE DU QUÉBEC**

### **LES OBSERVATIONS RÉCENTES**

Malgré l'augmentation de la température, de la fréquence et de la durée d'événements chauds extrêmes observées durant le XX<sup>e</sup> siècle au Québec, la fréquence des événements de sécheresse ainsi que leur sévérité sont en moyenne demeurées stables<sup>9,10</sup>.

Si ce bilan semble rassurant, il n'est cependant pas garant des risques futurs de sécheresse. Le début du XXI<sup>e</sup> siècle ayant notamment été témoin de plusieurs écarts à la normale des conditions de température et d'humidité estivales des sols (i.e. 2002, 2010 et 2012)<sup>11</sup>, il reste à savoir si ces événements resteront l'exception ou deviendront la norme.

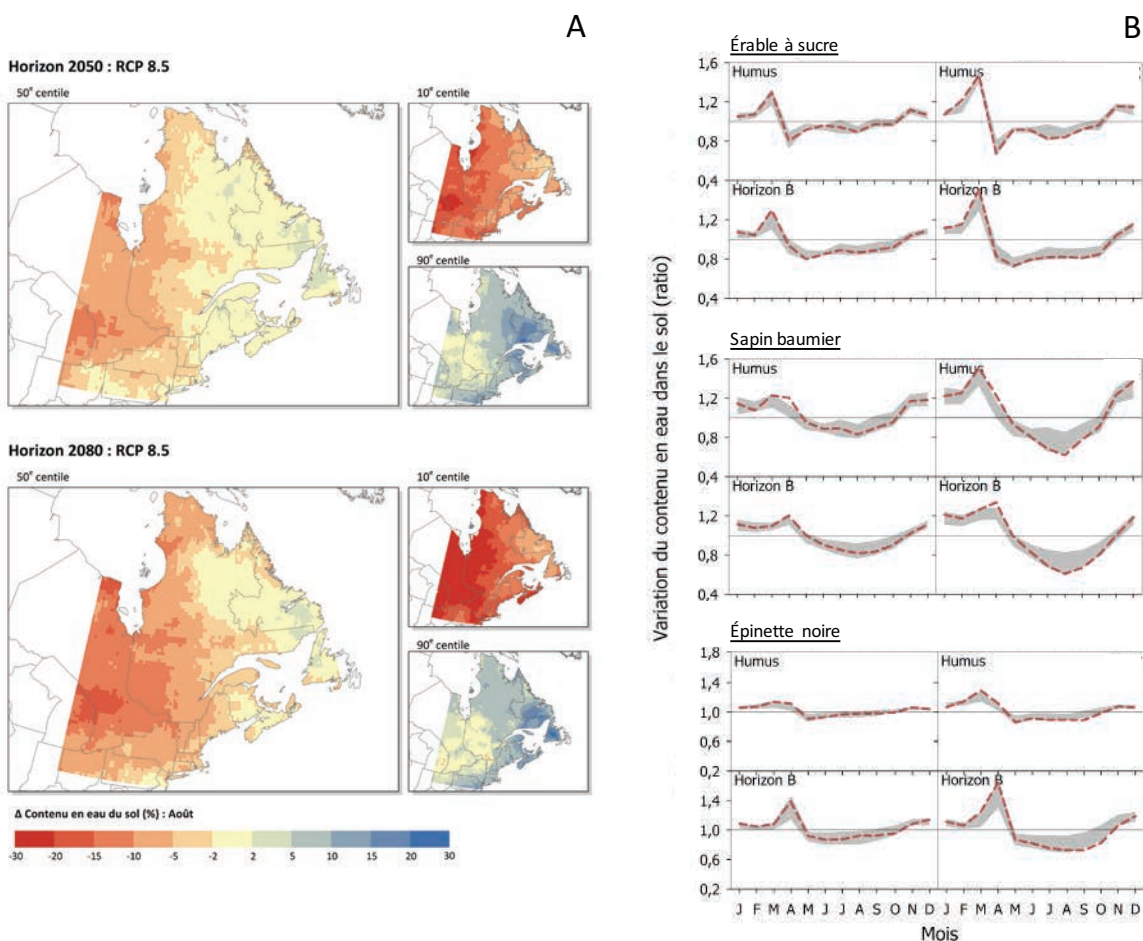
### **LE RISQUE DE SÉCHERESSE VA-T-IL AUGMENTER DANS LE FUTUR ?**

Les plus récentes projections climatiques sur l'ensemble du Québec forestier font consensus : le prochain siècle sera marqué par des saisons de croissance plus longues et plus chaudes et par une diminution du contenu en eau des sols, augmentant le risque de sécheresse<sup>9,12-15</sup>.

Pour la période estivale, dans le centre du Québec, ce sont des hausses de température de l'air comprises entre 1,2 et 4,5°C qui sont projetées pour la période 2041-2070, et de 1,6 à 7,1°C pour la période 2071-2100, comparativement à 1971-2000<sup>9</sup>. À noter qu'une hausse de température estivale de 5°C pour la Côte-Nord équivaldrait à y retrouver les conditions climatiques observées présentement dans la région de Montréal!

Bien qu'une hausse des précipitations annuelles soit projetée pour le Québec, les précipitations changeront peu pendant la saison estivale. Ainsi, un changement limité dans les précipitations associé à une augmentation substantielle de la température mènerait à une diminution du contenu en eau des sols pendant l'été. Ces baisses seraient surtout observées dans l'ouest de la province en 2050 mais s'étendraient à l'ensemble du Québec forestier à l'horizon 2080 (Figure 2)<sup>16</sup>. Des simulations bâties à partir de données empiriques de contenu en eau des sols projettent en effet des baisses moyennes de l'ordre de 0 à 40% pour la période 2041-2070, et de 14 à 40% pour la période 2071-2100 (voir Figure 2)<sup>9,12</sup>.

Ces résultats suggèrent donc une baisse du contenu moyen en eau des sols forestiers à relativement brève échéance, laissant du même coup présager une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse. Il importe donc de s'y préparer dès maintenant!



**Figure 2.** Changements relatifs projetés dans le contenu en eau des sols estimé à partir d'un indice canadien de sécheresse (Canadian Drought Code) entre la période de référence 1971-2000 et deux horizons temporels. **Panneau A :** Changement du contenu en eau des sols au mois d'août pour les horizons 2050 et 2080, calculé à partir de modèles de circulation générale (Logan T., Ouranos, résultats non publiés). La colonne de droite représente la médiane du changement, alors que la deuxième colonne comprend les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles pour chaque horizon. **Panneau B :** Résultats de simulations de températures et de précipitations, et calibrées à partir de modèles hydrologiques locaux calculés respectivement pour trois forêts dominées par l'érable à sucre, le sapin baumier et l'épinette noire (adapté de Houle et al. 2012<sup>12</sup>).

# IMPACTS ET RÉPONSES DES ARBRES À LA SÉCHERESSE

Sous des conditions normales d'humidité et de température, le transport de l'eau dans l'arbre s'effectue des racines jusqu'à la surface des feuilles. L'eau circule ainsi dans les vaisseaux du bois de l'endroit le plus humide (sol) vers l'endroit le plus sec (atmosphère), comme dans une paille. Elle participe alors à la *photosynthèse* ou encore est évacuée dans l'atmosphère par les *stomates* sous forme de vapeur d'eau<sup>17</sup>.

## ET SURVIENT LA SÉCHERESSE...

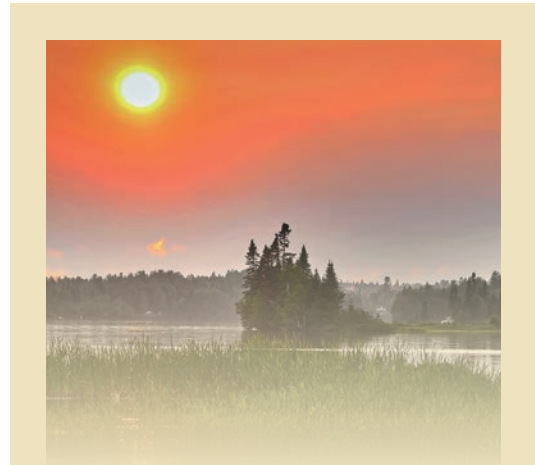
En conditions de faible humidité et de haute température, le pouvoir asséchant de l'atmosphère augmente la force « aspirante » au niveau des feuilles, alors que les faibles réserves d'eau du sol ne peuvent répondre à la demande. La chaîne de transport de l'eau se rompt alors, et comme dans un cas où l'on aspirerait de l'eau par une paille dans un verre d'eau presque vide, des bulles d'air se forment dans les vaisseaux. Ces *embolies* bloquent alors l'acheminement de l'eau et des nutriments vers les différentes parties de l'arbre, pouvant nuire à l'hydratation et l'alimentation de ses cellules<sup>17</sup>.

## RÉPONSES DES ARBRES À LA SÉCHERESSE

Certaines caractéristiques physiologiques des arbres peuvent minimiser les impacts négatifs de la sécheresse sur leur santé. Une réponse commune des végétaux à un tel événement climatique consiste en effet à fermer leurs stomates de façon à éviter les pertes en eau et à minimiser les occasions d'embolie. Toutefois, en empêchant les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse, cette fermeture peut nuire à la production de sucres saisonnière, et donc à la croissance de l'arbre, si la sécheresse persiste.

En réponse à une sécheresse, certaines essences répondent plutôt en maintenant ou en favorisant l'ouverture des stomates de façon à maximiser la captation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui maintient à la fois le stress hydrique et les risques d'embolie.

L'impact net de la sécheresse dépendra non seulement de l'ouverture ou de la fermeture des stomates, mais aussi d'autres caractéristiques de l'espèce. Par exemple, le maintien de l'ouverture des stomates aura plus de chances d'assurer la vitalité chez une essence qui possède des vaisseaux du bois plus étroits moins à risque d'embolie ou des racines profondes lui permettant un approvisionnement en eau plus soutenu. La fermeture des stomates aura pour sa part plus de chances de diminuer les impacts sur la vitalité de l'arbre s'il possède des réserves suffisantes en sucres lui permettant d'alimenter ses cellules en l'absence temporaire de production photosynthétique.



## COUPS DE CHALEUR

Les vagues de chaleur peuvent constituer en elles-mêmes des sources de stress notables pour les arbres. En effet, les températures élevées perturbent les processus électrochimiques à la base du mécanisme de la *photosynthèse*<sup>52</sup>. Ainsi, même en présence de quantités suffisantes de CO<sub>2</sub> et d'eau, la production de sucres utilisables par l'arbre s'en retrouve réduite et la croissance limitée.

Il faut souligner que les stratégies d'adaptation d'un arbre à son milieu sont inscrites dans son code génétique suite à des milliers d'années d'évolution. La capacité d'un arbre à s'adapter à de nouvelles conditions environnementales au cours de sa vie reste limitée, particulièrement si l'on considère la rapidité et l'ampleur des changements climatiques attendus.

### **DES IMPACTS SUR LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DE BOIS**

Un des impacts les plus notables de la sécheresse est une diminution de la taille et du nombre de cellules produites dans le cerne annuel, résultant en une diminution de sa croissance. Plusieurs études québécoises font d'ailleurs état de corrélations entre l'accroissement des cernes de croissance d'un arbre et les conditions de sécheresse auxquelles il a été récemment exposé. Pour plusieurs espèces telles que le pin gris, l'érable à sucre, le sapin baumier, le thuya occidental, les épinettes noires et blanches, ainsi que les chênes rouge et blanc, une tendance ressort distinctement: la largeur de l'anneau de croissance est négativement corrélée à l'index de sécheresse de l'année en cours et parfois des années précédentes<sup>18-21</sup>. L'impact d'une sécheresse survenue une année donnée peut en effet parfois se faire ressentir pendant plusieurs années, en diminuant notamment les ressources disponibles pour le développement de bourgeons foliaires puis des feuilles. La surface photosynthétique de l'arbre peut ainsi s'en retrouver réduite, diminuant son potentiel de croissance pour les années suivantes<sup>22-24</sup>.

Avec les années, une moins grande croissance radiale et verticale de l'arbre, induite par la sécheresse, diminuerait donc le volume de bois produit. Une étude récente prévoit ainsi que le contenu en eau du sol sera de plus en plus un facteur limitant de la productivité des forêts d'épinette noire canadiennes au courant du prochain siècle<sup>25</sup>. De plus, il est à noter que la sensibilité du cerne de croissance à la variabilité interannuelle dans les conditions de sécheresse aurait également pour effet de diminuer la qualité du bois, en engendrant une densité de bois plus inégale.

### **JUSQU'À CE QUE LA MORT NOUS SÉPARE ?**

L'ampleur des impacts de la sécheresse sur les forêts dépendra donc tout d'abord de leur degré d'exposition à ce phénomène. En d'autres mots, plus les événements de sécheresse seront intenses, longs et fréquents, plus les impacts biologiques seront grands. Des interactions entre la présence de sécheresses et d'autres types de perturbations naturelles peuvent également hausser le risque de mortalité des arbres. En particulier, il est attendu qu'une hausse de l'assèchement des forêts mènera à une augmentation de la fréquence des feux<sup>26</sup>, pouvant avoir des effets destructeurs sur les peuplements. En diminuant la vigueur de l'arbre, les événements de sécheresse les rendront également plus sensibles à d'autres types de stress tels que les attaques d'insectes et les infections fongiques, augmentant ainsi leurs risques de mortalité.

L'impact de la sécheresse sur les forêts dépendra ensuite de la sensibilité et de la capacité adaptative des arbres face à ces événements, de même que des caractéristiques du peuplement, comme par exemple sa composition ou sa structure d'âge. Notamment, des différences de tolérance dans les conditions climatiques favorables à différentes espèces, certaines étant mieux adaptées à la sécheresse que d'autres, mèneront probablement à des changements dans leur abondance relative en réponse aux changements climatiques et donc à des changements de composition des forêts. Un résumé des principaux facteurs de vulnérabilité des peuplements et des arbres à la sécheresse est présenté au Tableau 1.

L'hétérogénéité dans ces facteurs de vulnérabilité, observée à différentes échelles spatiales, déterminera donc le caractère diffus ou uniforme de ces impacts à travers les peuplements forestiers. Par exemple, des chercheurs ont rapporté que la mortalité enregistrée lors de sécheresses extrêmes dans le sud-ouest des États-Unis s'échelonnait de 0 à 100 % selon l'élévation, la texture et le type de sols, de même que selon le statut nutritionnel du site et l'espèce considérée<sup>27</sup>. Il reste ainsi difficile de prédire des seuils de mortalité généraux, par biome ou par espèce. La surveillance et la connaissance locale du territoire demeurent donc des outils importants pour détecter et mieux comprendre les effets de la sécheresse sur nos forêts.



**Tableau I.** Facteurs de vulnérabilité des peuplements et des arbres à la sécheresse

FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ	SYSTÈMES LES PLUS VULNÉRABLES	EXPLICATIONS PRINCIPALES
Type de biome (forêts feuillues VS de conifères)	Dépend des biomes et des espèces	<p><i>Feuillus (en comparaison des conifères)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Favorisent l'ouverture des stomates pour captation du CO<sub>2</sub> pour maximiser la croissance pendant la courte saison de déploiement des feuilles, ce qui accroît cependant leur vulnérabilité à l'embolie<sup>28,29</sup>.</li> <li>- Type de sol généralement plus drainé des peuplements de feuillus retient moins bien l'eau<sup>30</sup>.</li> <li>- Ne peuvent bénéficier d'un commencement rapide de la saison de croissance pour accumuler du carbone étant donné leur feuillage décliné<sup>31</sup>.</li> </ul> <p><i>Conifères (en comparaison des feuillus)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins grande capacité de réparation des embolies.</li> <li>- Favorisent la fermeture des stomates pour limiter les pertes en eau, ce qui accroît cependant leur vulnérabilité au déficit en sucres<sup>28,29</sup>.</li> <li>- Racines en général plus superficielles limitent leur accès aux réserves d'eau profondes<sup>29</sup>.</li> <li>- Cuticules cireuses repoussent l'eau vers le sol, minimisant son évaporation et favorisant sa réabsorption par l'arbre dans le sol<sup>32</sup>.</li> </ul> <p><i>Tous</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolérance climatique de l'espèce considérée (résistance à la chaleur et à la sécheresse diffère entre les espèces<sup>33</sup>).</li> <li>- Productivité limitée davantage par le manque d'eau au sud de la forêt que dans le nord<sup>34,35</sup>.</li> <li>- Espèces à bois moins dense sont plus vulnérables<sup>36</sup>.</li> </ul>
Âge de la forêt	Régénération (très jeunes forêts) et arbres surannés (vieilles forêts)	<p><i>Régénération</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Favorisent l'ouverture des stomates pour captation du CO<sub>2</sub> pour maximiser la croissance pendant la courte saison de déploiement des feuilles, ce qui accroît cependant leur vulnérabilité à l'embolie<sup>28,29</sup>.</li> <li>- Moins grande efficacité de la photosynthèse les met plus à risque de pénurie de sucres en cas de fermeture des stomates.</li> <li>- Accès à une quantité réduite de carbone pour compenser les pertes induites lors de la fermeture des stomates.</li> <li>- Racines plus courtes limitent l'accès à l'eau, particulièrement si enracinées seulement dans les couches organiques du sol, séchant plus vite<sup>37,38</sup>.</li> </ul> <p><i>Arbres surannés</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande sensibilité de la respiration des vieux arbres aux fortes températures, augmentant les pertes en eau en période de grande chaleur<sup>39</sup>.</li> <li>- Arbres de plus grande taille (voir ci-dessous).</li> </ul>
Densité de la forêt	Forêt dense et zones dénudées	<p><i>Forêt dense</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande compétition pour l'eau, menant à de plus faibles quantités accessibles par chaque arbre<sup>40</sup>.</li> </ul> <p><i>Zones dénudées</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande température et évaporation sur les sols exposés (ex : zone de coupe à blanc) accentuent les conditions de sécheresse<sup>37,41</sup>, bien que plus d'eau de pluie pénètre dans le sol.</li> </ul>
Taille de l'arbre	Grands arbres	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande exposition à la radiation maximise les dommages photosynthétiques causés par la chaleur.</li> <li>- Plus grand couplage avec l'atmosphère chaude et asséchée augmente les pertes en eau par évapotranspiration.</li> <li>- Plus grand besoins en ressources pour assurer les fonctions physiologiques d'un grand arbre le rendent plus sensible aux bris dans l'approvisionnement en carbone.</li> </ul>
Stade phénologique de l'arbre au moment de la sécheresse	Stade de débourrement (Guide sylvicole, Tome I)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande sensibilité au manque de carbone lors du développement des tissus photosynthétiques.</li> </ul>

# QUELS SONT LES RISQUES ASSOCIÉS AUX SÉCHERESSES POUR LE SECTEUR FORESTIER ?

## IMPACTS SUR LES OPÉRATIONS FORESTIÈRES

Un régime plus intense de sécheresse pourrait d'une part influencer la bonne marche des opérations forestières.

- Une intensification du régime de sécheresse en forêt québécoise, menant à des hausses de l'indice forêt météo, augmenterait en effet le nombre de jours d'arrêt des opérations en raison de risques élevés d'incendies.
- La mortalité diffuse liée à la sécheresse<sup>27</sup>, augmentant les quantités de bois irrécupérables sur le territoire et diminuant les volumes de bois récoltés, pourra également nécessiter une réduction des possibilités de coupes annuelles afin de maintenir une stabilité d'approvisionnement d'année en année.
- Même en cas de mortalité localisée, les coupes de récupération des arbres morts pourraient induire des coûts supplémentaires d'exploitation, particulièrement si le réseau de chemins forestiers doit être étendu afin d'accéder aux sites concernés.

D'autre part, la sécheresse pourrait également avoir des impacts positifs sur les opérations forestières. Par exemple, elle pourrait faciliter la construction de chemins, favoriser les opérations de récolte dans les sites humides durant l'été, tout en minimisant l'orniérage des chemins d'accès.

## IMPACTS SUR LES CHOIX D'AMÉNAGEMENT

En affectant la croissance (radiale et en hauteur) et le risque de mortalité des arbres, la sécheresse aura des impacts sur le volume du bois produit ainsi que sur la qualité et la valeur des arbres pour l'industrie forestière. À plus long terme, une hausse de la fréquence des sécheresses pourrait aussi modifier la composition et la structure de classes d'âges des peuplements, en raison de différence de sensibilité à la sécheresse entre les espèces et les classes d'âges (voir Tableau 1). Une modification des stratégies d'aménagement pour les peuplements soumis à la sécheresse, incluant le choix des essences à promouvoir, du régime sylvicole et/ou de l'intensité d'aménagement devrait donc être envisagée afin de maintenir et potentiellement augmenter la valeur des forêts et leur productivité face aux changements climatiques. Des exemples de telles mesures d'adaptation sont présentés dans la prochaine section.

# OPTIONS D'ADAPTATION

## MESURER L'AMPLEUR DES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR NOS FORÊTS

Une option importante à considérer dans un cadre d'adaptation aux changements climatiques consiste à développer et maintenir un réseau de suivi qui puisse rendre compte de l'évolution temporelle des forêts. Ces réseaux, comme le Réseau d'Étude et de Surveillance des Écosystèmes Forestiers (RESEF) par exemple, permettent d'évaluer plus précisément et localement les impacts des changements climatiques sur les forêts, se posant comme une approche sans regret pour le secteur forestier quelle que soit l'évolution future du climat et des forêts. Le réseau des placettes temporaires

et permanentes du service des inventaires forestiers ainsi que le réseau des effets réels, du MFFP, peuvent aussi être très utiles à cette fin. En présence d'impacts négatifs induits par ces changements climatiques et/ou d'impacts projetés, des mesures adaptatives appropriées aux enjeux locaux peuvent être mises en place de façon à soutenir la production forestière actuelle ou future. Les réseaux de monitoring pourraient alors fournir des données de contrôle pertinentes auxquelles l'on pourrait comparer l'efficacité de mesures d'adaptation.

### **CHOISIR UNE STRATÉGIE D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Le choix d'une stratégie d'adaptation face à la sécheresse ne représente pas une tâche évidente et facile étant donné la grandeur du territoire forestier au Québec et l'état actuel des connaissances autant sur les impacts des sécheresses que sur les traitements sylvicoles appropriés. Les considérations à prendre en compte sont, entre autres, la vulnérabilité du peuplement, son importance économique en regard d'autres espèces pouvant la remplacer, et la probabilité qu'un traitement sylvicole donné augmente la résilience du peuplement comparativement aux coûts impliqués<sup>42</sup>. Deux stratégies principales, visant à maximiser la vitalité des arbres d'un peuplement soumis à des conditions changeantes, ont été identifiées dans la littérature scientifique (Figure 3)<sup>43</sup>. Elles visent soit à réduire les facteurs de stress ou à augmenter la résilience des peuplements.

#### **Réduire les facteurs de stress**

Cette première option vise à maintenir des conditions de croissance optimales pour une essence donnée dans un contexte où la sécheresse est appelée à augmenter dans le futur. Cela peut se faire, par exemple, en agissant sur les contenus en eau du sol. Par exemple, la pratique de coupes sélectives, visant à réduire la densité de la forêt, peut réduire le stress hydrique à l'échelle du peuplement. Cette pratique minimise la pression sur les réserves en eau et peut assurer un accès suffisant aux arbres restants<sup>40, 44, 45</sup>.

#### **Réduire la sensibilité des peuplements et augmenter leur capacité d'adaptation**

Le maintien de peuplements forestiers comprenant un plus grand nombre d'espèces et de génotypes mieux adaptés aux conditions du sol et aux conditions climatiques futures représente une autre option permettant d'augmenter leur capacité d'adaptation. La mixité peut en effet atténuer les impacts négatifs d'une sécheresse sur la croissance ou la mortalité en équilibrant le rendement des différentes espèces ayant des tolérances plus ou moins grandes à la sécheresse. Une équipe de recherche québécoise a d'ailleurs signalé cette fonction dans la forêt boréale abitibienne où le peuplier faux-tremble et l'épinette noire se côtoient. Les années plus froides et humides favorisent la croissance de l'épinette au détriment du peuplier faux-tremble, alors que les années chaudes et sèches favorisent le peuplier



### **UNE RÉGÉNÉRATION EN DANGER**

Un des enjeux les plus importants liés aux choix d'aménagement en condition de sécheresse concernera la gestion du stade de régénération. Sa plus grande vulnérabilité à la sécheresse (voir Tableau 1) pourra en effet requérir un recours accru au reboisement avec des plants mieux adaptés à la sécheresse pour suppléer à un taux de mortalité plus élevé dans la régénération naturelle. Ceci pourrait nécessiter de plus grands investissements pour le suivi et le maintien d'une quantité et qualité suffisante de régénération afin de soutenir une stabilité future dans l'approvisionnement en bois.

faux-tremble au détriment de l'épinette, ayant pour effet de soutenir et de stabiliser la productivité du peuplement sous un climat changeant<sup>46</sup>.

Le renouvellement des espèces ou des *génotypes* forestiers, en considérant notamment leur potentiel d'adaptation à la sécheresse, peut également s'avérer une stratégie profitable pour diminuer la sensibilité et augmenter la capacité adaptative des peuplements. En effet, le maintien d'un optimum entre la composition forestière et les conditions climatiques ne pourra s'effectuer sans interventions humaines, étant donné la faible vitesse de dispersion naturelle des arbres comparativement à la vitesse et à l'ampleur des changements climatiques attendus<sup>47</sup>.

Bien que cette pratique ne puisse porter fruit qu'à moyen ou long terme, la modification de l'abondance des espèces naturellement présentes sur le territoire est une option à considérer en vue des changements dans les conditions de sécheresse à l'échelle du Québec. Par cette mesure, on vise à favoriser les espèces et génotypes plus tolérants à la sécheresse dans les peuplements à risque, même si les conditions actuelles de croissance n'y sont pas encore optimales pour eux. Par exemple, il serait possible de planter des pins (résistants à la sécheresse) non seulement sur des sites secs où ils croissent bien, mais aussi sur des sites plus humides actuellement mais qui sont plus à risque d'assèchement dans le futur. Les génotypes les mieux adaptés à la sécheresse peuvent d'ailleurs être sélectionnés plus optimalement par tests de provenance ou par études génomiques<sup>48-50</sup>. L'abondance relative d'espèces adaptées à la sécheresse peut également être augmentée par l'utilisation de coupes sélectives. Lorsque l'introduction de nouvelles espèces dans le peuplement pose peu de risques d'invasion, la migration assistée de populations ou d'espèces adaptées à la sécheresse dans des zones hors de leur aire de distribution actuelle peut aussi être considérée.

Conjointement à de telles mesures, le raccourcissement des cycles de rotation des plantations permettrait un renouvellement plus rapide de leur composition en favorisant la présence d'individus adaptés aux nouvelles conditions environnementales rencontrées, et ce, au fil du temps<sup>41</sup>.

### **Limiter les répercussions négatives d'une sécheresse**

La récupération des arbres morts peut s'avérer appropriée pour minimiser les pertes de bois suite à un épisode de sécheresse ayant entraîné une forte mortalité, particulièrement quand les peuplements atteints sont suffisamment localisés et facilement accessibles. Le développement d'une meilleure capacité de prédiction de la mortalité suite à un épisode de sécheresse, passant par une meilleure compréhension des facteurs de vulnérabilité pouvant influencer la réponse des peuplements (voir Tableau 1), représente une mesure supplémentaire pouvant contribuer à mieux planifier la récupération et ainsi minimiser les pertes et les coûts de cette opération.

<b>PETIT GLOSSAIRE VÉGÉTAL</b>	
<b>TERME</b>	<b>DÉFINITION</b>
<b>Embolie</b>	Pénétration d'air dans les vaisseaux du bois interrompant la circulation de la sève.
<b>Espèce</b>	Ensemble d'individus pouvant se reproduire exclusivement entre eux. Ex : pin gris, épinette noire, peuplier faux-tremble.
<b>Évapotranspiration</b>	Transfert d'eau vers l'atmosphère par évaporation directe de l'eau (du sol, interceptée par la canopée et provenant des étendues d'eau) et la transpiration des plantes.
<b>Génotype</b>	Ensemble des caractéristiques génétiques d'un individu. Un même génotype peut être partagé par plusieurs individus d'une même espèce, généralement distribués dans une même région. Plusieurs génotypes ayant des affinités environnementales légèrement différentes les unes des autres peuvent être trouvés dans une espèce.
<b>Photosynthèse</b>	Processus permettant aux plantes de transformer l'énergie des rayons du soleil en sucres dont les cellules ont besoin pour vivre et se reproduire.
<b>Stomates</b>	Petites ouvertures dans les feuilles permettant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère.

## Enjeux d'adaptation

En somme, il sera nécessaire d'évaluer les options d'adaptation sous différents angles (performance technique, coûts et bénéfices économiques, sociaux et environnementaux, acceptabilité sociale, barrières et opportunités pour leur mise en œuvre, etc...) avant leur mise en place en forêt québécoise. Le succès de telles mesures dépendra ainsi des efforts conjoints et de la collaboration de tous les acteurs de ce secteur d'activité (praticiens, chercheurs, institutions gouvernementales, entreprises privées).

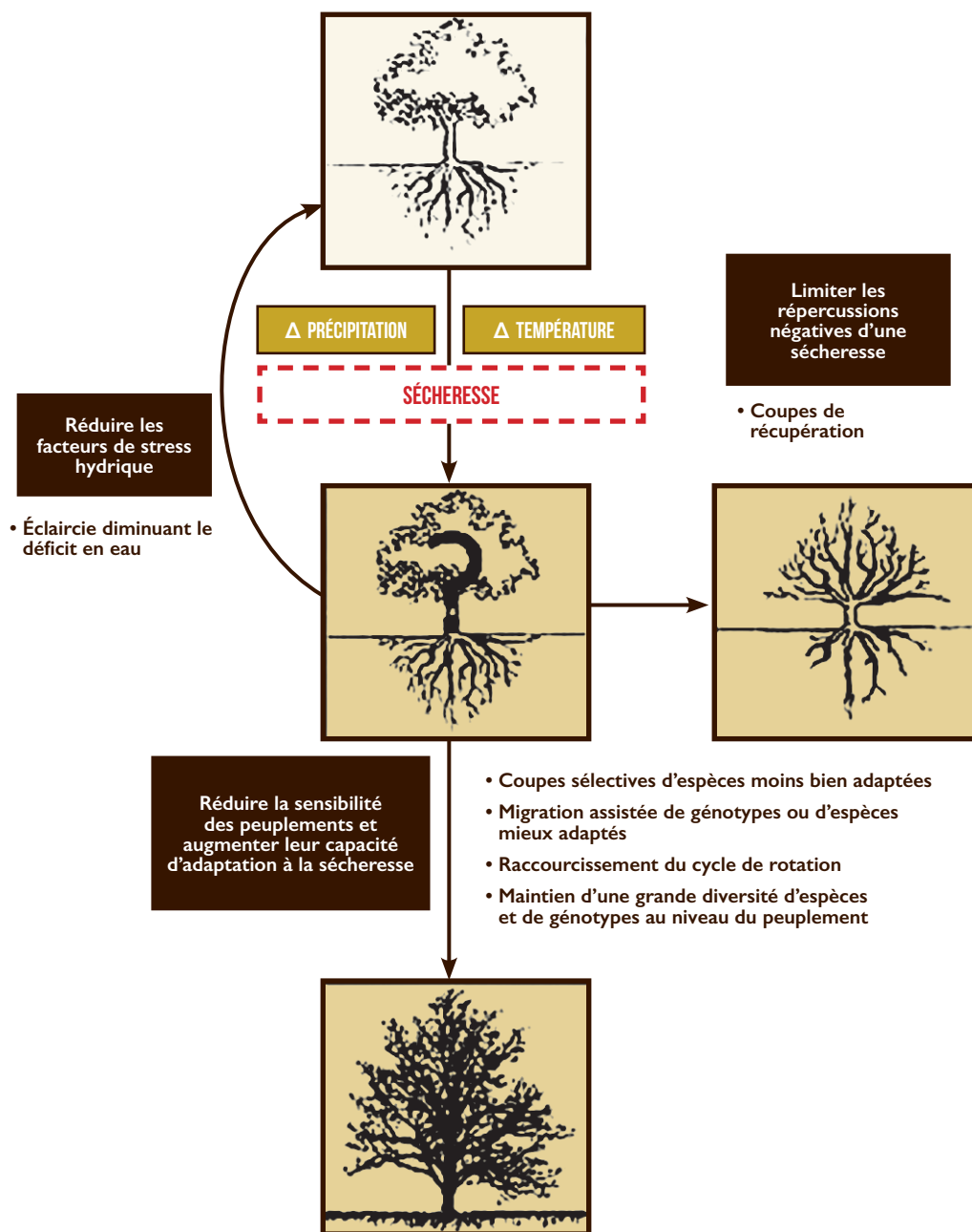


Figure 3. Exemples d'options d'adaptation en réponse à la sécheresse

# RÉFÉRENCES

1. Allen, C. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? *Food and Agriculture Organization of the United Nations* at <http://www.fao.org/docrep/011/i0670e/i0670e10.htm>
2. Peng, C. et al. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Clim. Change* **1**, 467–471 (2011).
3. Michaelian, M., Hogg, E. H., Hall, R. J. & Arseneault, E. Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest. *Glob. Chang. Biol.* **17**, 2084–2094 (2011).
4. Huang, C.Y. & Anderegg, W. R. L. Large drought-induced aboveground live biomass losses in southern Rocky Mountain aspen forests. *Glob. Chang. Biol.* **18**, 1016–1027 (2012).
5. Girardin, M. P. et al. Unusual forest growth decline in boreal North America covaries with the retreat of Arctic sea ice. *Glob. Chang. Biol.* **20**, 851–866 (2014).
6. Hanewinkel, M., Cullmann, D. A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J. & Zimmermann, N. E. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Clim. Change* **3**, 203–207 (2012).
7. Lévesque, M. et al. Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 3184–3199 (2013).
8. Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie. Le prix à payer: répercussions économiques du changement climatique pour le Canada. (2011).
9. Ouranos. *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec.* (2014).
10. Girardin, M.-P., Tardif, J., Flannigan, M. D., Wotton, B. M. & Bergeron, Y. Trends and periodicities in the Canadian Drought Code and their relationships with atmospheric circulation for the southern Canadian boreal forest. *Can. J. For. Res.* **34**, 103–119 (2004).
11. D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L. & Côté, B. Can the Canadian drought code predict low soil moisture anomalies in the mineral soil? An analysis of 15 years of soil moisture data from three forest ecosystems in Eastern Canada. *Ecohydrology In press.* (2015).
12. Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T. & Harvey, R. Projections of future soil temperature and water content for three Southern Quebec forested sites. *J. Clim.* **25**, 7690–7701 (2012).
13. Houle, D., Logan, T., Harvey, R., Marty, C. & Duchesne, L. Cartographie de l'effet des changements climatiques sur la température et l'humidité des sols pour l'ensemble du Québec forestier. *Ouranos* (2015).
14. Huang, J.-G. et al. Impact of future climate on radial growth of four major boreal tree species in the Eastern Canadian boreal forest. *PLoS One* **8**, e56758 (2013).
15. Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M. P. & Carcaillet, C. Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: Collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *Int. J. Wildl. Fire* **19**, 1127–1139 (2010).
16. Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. & Houle, D. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. *Ouranos* (2011).
17. McElrone, A. J., Choat, B., Gambetta, G. A. & Brodersen, C. R. Water uptake and transport in vascular plants. *Nat. Educ. Knowl.* **4**, 6 (2013).
18. Payette, S., Fortin, M.-J. & Morneau, C. The recent sugar maple decline in southern Quebec: probable causes deduced from tree rings. *Can. J. For. Res.* **26**, 1069–1078 (1996).
19. Tardif, J. & Bergeron, Y. Comparative dendroclimatological analysis of two black ash and two white cedar populations from contrasting sites in the Lake Duparquet region, northwestern Quebec. *Can. J. For. Res.* **27**, 108–116 (1997).
20. Tardif, J., Conciatori, F. & Bergeron, Y. Comparative analysis of the climatic response of seven boreal tree species from northwestern Québec, Canada. *Tree-ring Res.* **57**, 169–181 (2001).
21. Tardif, J. & Conciatori, F. A comparison of ring-width and event-year chronologies derived from white oak (*Quercus alba*) and northern red oak (*Quercus rubra*), southwestern Quebec, Canada. *Dendrochronologia* **23**, 133–138 (2006).
22. Barber, V. a., Juday, G. P. & Finney, B. P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature* **405**, 668–673 (2000).
23. Gruber, A., Strobl, S., Veit, B. & Oberhuber, W. Impact of drought on the temporal dynamics of wood formation in *Pinus sylvestris*. *Tree Physiol.* **30**, 490–501 (2010).
24. Lévesque, M., Rigling, A., Bugmann, H., Weber, P. & Brang, P. Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agric. For. Meteorol.* **197**, 1–12 (2014).
25. Girardin, M. P. et al. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming. *Glob. Chang. Biol.* (2015).
26. Price, D. T. et al. Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environ. Rev.* **365**, 322–365 (2013).
27. Gitlin, A. R. et al. Mortality gradients within and among dominant plant populations as barometers of ecosystem change during extreme drought. *Conserv. Biol.* **20**, 1477–1486 (2006).
28. Maherali, H., Pockman, W. T. & Jackson, R. B. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology* **85**, 2184–2199 (2004).
29. Carnicer, J., Barbeta, A., Sperlich, D., Coll, M. & Peñuelas, J. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale. *Front. Plant Sci.* **4**, 409 (2013).
30. Welp, L. R., Randerson, J. T. & Liu, H. P. The sensitivity of carbon fluxes to spring warming and summer drought depends on plant functional type in boreal forest ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* **147**, 172–185 (2007).

31. Graumlich, J. J. Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. *Can. J. For. Res.* **23**, 133–143 (1993).
32. McGuire, a. D. *et al.* Vulnerability of white spruce tree growth in interior Alaska in response to climate variability: dendrochronological, demographic, and experimental perspectives. *Can. J. For. Res.* **40**, 1197–1209 (2010).
33. Craven, D. *et al.* *L'aménagement écosystémique des forêts privées du Centre-du-Québec dans le contexte des changements globaux.* (2013).
34. Hogg, E. H. & Bernier, P.Y. Climate change impacts on drought-prone forests in western Canada. *For. Chron.* **81**, 675–682 (2005).
35. Lindner, M. *et al.* *Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation.* (2008).
36. Dalla-Salda, G., Martinez-Meier, A., Cochard, H. & Rozenberg, P. Genetic variation of xylem hydraulic properties shows that wood density is involved in adaptation to drought in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)). *Ann. For. Sci.* **68**, 747–757 (2011).
37. Stewart, J. D., Zine El Abidine, a & Bernier, P.Y. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in black spruce seedlings during multiple cycles of drought. *Tree Physiol.* **15**, 57–64 (1995).
38. Greene, D. F. *et al.* The reduction of organic-layer depth by wildfire in the North American boreal forest and its effect on tree recruitment by seed. *Can. J. For. Res.* **37**, 1012–1023 (2007).
39. Girardin, M. P., Guo, X. J., Bernier, P.Y., Raulier, F. & Gauthier, S. Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits. *Biogeosciences* **9**, 2523–2536 (2012).
40. D'Amato, A. W. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecol. Appl.* **23**, 515–522 (2013).
41. Park, A. *et al.* Can Boreal and Temperate Forest Management be Adapted to the Uncertainties of 21st Century Climate Change? *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* **33**, 251–285 (2014).
42. Bolte, A. *et al.* Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand. J. For. Res.* **24**, 473–482 (2009).
43. Gauthier, S. *et al.* Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environ. Rev.* **30**, 1–30 (2014).
44. Alam, A., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scand. J. For. Res.* **23**, 501–512 (2008).
45. Elkin, C., Giuggiola, A., Rigling, A. & Bugmann, H. Short- and long-term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests in the European Alps. *Ecol. Appl.* **25**, 1083–1098 (2015).
46. Drobyshchev, I., Gewehr, S., Berninger, F. & Bergeron, Y. Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *J. Ecol.* **101**, 231–242 (2013).
47. Johnston, M. *Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier.* (2009).
48. Chmura, D. J. *et al.* Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. *For. Ecol. Manage.* **261**, 1121–1142 (2011).
49. Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V. & Brüggemann, W. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environ. Exp. Bot.* **111**, 91–113 (2015).
50. Duveneck, M. J. & Scheller, R. M. Climate suitable planting as a strategy for maintaining forest productivity and functional diversity. *Ecol. Appl.* (2015).
51. Barnett, T. P., Adam, J. C. & Lettenmaier, D. P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* **438**, 303–309 (2005).
52. Rennenberg, H. *et al.* Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biol.* **8**, 556–571 (2006).

## PHOTOGRAPHIES

### Couverture

Photomontage : Pixabay.com

Grue grabber avec troncs : Peter Burnett, iStock

### Page 1

Sol séché en Abitibi (2010) : Guillaume Ajavon

### Page 5

Coucher de soleil : Pixabay.com

### Page 9

Jeune pousse d'épinette, Abitibi (2010) : Guillaume Ajavon

### Page 11

Illustration arbre feuillu avec racine : University of Minnesota, Extension  
Arbre feuillu : photobucket.com

### Couverture arrière

Perte de feuillage dans le parc de la Gatineau (2012) : Louis Harvey

