

**Faculté des bioingénieurs**

**Les forêts dans un contexte incertain : Stratégies pour restaurer et améliorer la résilience de l'érablière rouge du Centre-du-Québec, à l'aide des données de régénération.**

Auteure : Lola Badalamenti

Promoteurs : Quentin Ponette, Mathieu Jonard

Lecteurs : Caroline Vincke, Christian Messier

Année académique 2022-2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : Master en gestion des forêts et des espaces naturels



Merci à mes promoteurs, Pr Mathieu Jonard et Pr Quentin Ponette, pour m'avoir guidée tout au long de ce mémoire.

Un énorme merci à Arthur Guignabert, qui a été mon plus grand soutien, tant sur le terrain, au Québec, dans le domaine informatique, pour ses références, le travail qu'il m'a partagé, pour mes simulations, ses relectures et corrections, et également pour le soutien moral qu'il a été pour moi.

Merci une nouvelle fois à Arthur Guignabert et à Antoine Crochet, sans qui ce mémoire n'aurait pas pu être terminé à temps. Merci de m'avoir épaulée et d'avoir pris autant de temps pour mes résultats... Et pour le reste !

Merci également au Pr Christian Messier, pour m'avoir aidée à organiser ma venue au Québec.

Merci à Frédéric Brossard-Pellerin de m'avoir accompagnée et aidée sur le terrain, de m'avoir soutenue, de s'être démené pour que j'arrive à mes fins, et surtout d'être devenu un très bon ami québécois.

Merci à Geneviève, Isabelle et Jean, pour m'avoir accueillie au Québec, et permis de réaliser ce travail.

Merci aux chercheurs ayant contribué, de près ou de loin à la réussite de ce mémoire et aux partages de données et savoir expérimentaux.

Enfin, merci à mes proches, mes ami.e.s, ma famille, de m'avoir soutenue dans ce travail, qui représentait, par moments, une épreuve difficile. Merci d'avoir toujours cru que j'en étais capable.



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

BAU : Business as usual

TC : Tonne de carbone

CCmoy : Adaptation moyenne aux changements climatiques

CCmoy + DF : Adaptation moyenne aux changements climatiques, et augmentation de la diversité fonctionnelle

CCforte + DF : Adaptation forte aux changements climatiques, et augmentation de la diversité fonctionnelle

ET : Évapotranspiration

G : Surface terrière

GES : Gaz à effet de serre

IS : Indice de Simpson

LAI : Indice de surface foliaire

NM : No management = Libre évolution

ppm : Part par million

PPN ou NPP : Productivité primaire nette

RCP : Profil Représentatif d'évolution de Concentration

## TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>TABLES DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX.....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>10</b>
<b>2. STRATÉGIE DE RECHERCHE .....</b>	<b>12</b>
<b>3. ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>14</b>
3.1. LA RÉGION DU CENTRE-DU-QUÉBEC .....	14
3.2. PORTRAIT DES FORETS DU CENTRE-DU-QUEBEC.....	15
3.3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GLOBAUX ET AU QUEBEC .....	18
3.4. MENACES ET PERTURBATIONS SUR LES FORETS .....	20
3.5. LES TEMPÊTES.....	22
3.6. LA RÉSILIENCE FORESTIERE .....	24
3.7. GESTIONS ADAPTATIVES .....	26
3.8. METHODE DE GESTION SYLVICOLE ET DE RENOUVELLEMENT ENVISAGEE .....	32
<b>4. MATÉRIEL ET MÉTHODE .....</b>	<b>33</b>
4.1. DESCRIPTION DU MODELE HETEROFOR .....	33
4.2. CALIBRATION DU MODULE DE REGENERATION .....	36
4.3. INITIALISATION DU MODELE.....	41
4.4. SIMULATIONS .....	45
4.5. ANALYSE DES SIMULATIONS.....	51
<b>5. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>56</b>
5.1. PARAMETRISATION DU MODULE DE REGENERATION .....	56
5.2. SITUATION INITIALE (2020) .....	61
5.3. ANALYSE DE SCENARIOS.....	62
5.4. CONTRIBUTION DES ESPÈCES INTRODUITES.....	77
5.5. ANALYSE DE LA RÉSILIENCE .....	78
<b>6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>84</b>
6.1. LA MODÉLISATION COMME OUTIL D'ADAPTATION DES ÉRABLIÈRES ROUGES DU CENTRE-DU-QUÉBEC FACE AUX TEMPÊTES ET AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	84
6.2. AMÉLIORATIONS ET PERSPECTIVES.....	86
<b>7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>90</b>
<b>8. ANNEXES .....</b>	<b>104</b>
ANNEXE 1 : AIRE DE DISTRIBUTION NATURELLE DE L'ÉRABLE ROUGE (MADELEINE CAUBOUÉ ET COTTE 2007) .....	104

ANNEXE 2 : FICHES DESCRIPTIVES DES ESSENCES ACCOMPAGNATRICES DE L'ÉRABLIÈRE ROUGE. ....	105
ANNEXE 3 : QUELQUES LÉGISLATIONS AU CANADA ET AU QUÉBEC .....	117
ANNEXE 4 : ÉTAPES PHENOLOGIQUES DE LA BIOMASSE FOLIAIRE DANS HETEROFOR .....	118
ANNEXE 5 : ÉQUATIONS GÉNÉRIQUES (AVEC ET SANS TOLÉRANCE À L'OMBRAGE).....	119
ANNEXE 6 : APPLICATION DE L'ÉQUATION GÉNÉRIQUE (SANS LES DONNÉES DE PEUPLIER) AUX ESPÈCES-CIBLES.....	121
ANNEXE 7 : RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR ET LE DIAMÈTRE AU COLLET .....	122
ANNEXE 8 : ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE NETTE, LORS DE LA PÉRIODE DE RÉCUPÉRATION, POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.....	124
ANNEXE 9 : ÉVOLUTION ET MOYENNES DES INDICATEURS DESCRIPTIFS, POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS. ....	125
ANNEXE 10 : AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU PROGRAMME HETEROFOR, LORS DE LA RÉALISATION DU MÉMOIRE. ....	126

## TABLES DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

<i>Figure 1 : Régions sociosanitaires du Québec (2015). La région du Centre-du-Québec, entourée en rouge, constitue le lieu de prise de mesures lors de la collecte de données.</i>	15
<i>Figure 2 : Composition forestière (essences principales) des forêts privées : Centre-du-Québec (Guay-Picard et al., 2015b).</i>	16
<i>Figure 3 : Évolution de la température de surface globale (moyenne annuelle) observée et simulée selon des facteurs humains et naturels ou uniquement naturels (soleil, volcans).</i>	19
<i>Figure 4 : Schéma conceptuel présentant la résilience, selon la résistance et le taux de récupération.</i>	25
<i>Figure 5 : Diagramme conceptuel du modèle HETEROFOR.</i>	34
<i>Figure 6 : Schéma conceptuel d'impact de la chute d'un arbre feuillu ou résineux, dans HETEROFOR.</i>	36
<i>Figure 7 : Position du peuplement témoin sur le site de Saint-Bonaventure, dans le Centre-du-Québec (Canada).</i>	42
<i>Figure 8 : Répartition du nombre d'arbres par classe de diamètre (gauche) et de hauteur (droite), dans le peuplement témoin initial (2020).</i>	43
<i>Figure 9 : Distribution des tiges d'érable rouge selon les classes de hauteur (2020).</i>	43
<i>Figure 10 : Disposition des placettes de caractérisation de la régénération dans les dispositifs SylvAdapt.</i>	44
<i>Figure 11 : Variation de la température des RCP2,6 (bleu) et 8,5 (rouge), par rapport à la période 1950-2005.</i>	47
<i>Figure 12 : Résumé des interventions réalisées lors des cinq scénarios sylvicoles des simulations.</i>	49
<i>Figure 13 : Plantations effectuées pour les scénarios d'enrichissement.</i>	50
<i>Figure 14 : Illustration des composants principaux de la résilience.</i>	54
<i>Figure 15 : Régressions linéaires associées aux paramètres spécifiques à chaque espèce.</i>	58
<i>Figure 16 : Distribution de la surface terrière, selon les classes de circonférence et les essences, de la situation initiale (2020) du peuplement.</i>	61
<i>Figure 17 : Gauche : Nombre d'individus à l'hectare de la futaie dans chaque classe de circonférence, en 2020. Droite : Nombre d'individus à l'hectare dans chaque classe de hauteur, en 2020.</i>	61
<i>Figure 18 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario de Libre évolution, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).</i>	64
<i>Figure 19 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099, lors du scénario de Libre évolution.</i>	64
<i>Figure 20 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario de Libre évolution.</i>	65
<i>Figure 21 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement par classe de circonférence et par espèce lors du scénario de Business as usual en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).</i>	67
<i>Figure 22 : Distribution de la surface terrière par classe de circonférence en 2099.</i>	67
<i>Figure 23 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario de Business as usual.</i>	68
<i>Figure 24 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).</i>	70
<i>Figure 25 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099.</i>	70

<i>Figure 26 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques.</i>	71
<i>Figure 27 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).</i>	72
<i>Figure 28 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099.</i>	73
<i>Figure 29 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle.</i>	73
<i>Figure 30 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation forte aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).</i>	75
<i>Figure 31 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099.</i>	76
<i>Figure 32 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario d'Adaptation forte aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle.</i>	76
<i>Figure 33 : Évolution de la surface terrière (G), à gauche, et de l'indice de surface foliaire (LAI), à droite, pour les différents scénarios.</i>	82
<i>Figure 34 : Résultats de l'analyse de la résilience du peuplement, pour les différents scénarios sylvicoles appliqués.</i>	83

*Tableau 1 : Liste des espèces mesurées pour la calibration du module de régénération du modèle HETEROFOR.*

	37
<i>Tableau 2 : Indicateurs utilisés pour l'analyse des régressions linéaires des paramètres obtenus.</i>	41
<i>Tableau 3 : Inventaire de la régénération du peuplement initial (2020).</i>	45
<i>Tableau 4 : Espèces déjà présentes et introduites lors des scénarios.</i>	50
<i>Tableau 5 : Paramètres obtenus pour l'équation de croissance en fonction de la lumière des cinq espèces-cibles, au stade de régénération.</i>	57
<i>Tableau 6 : Table du peuplement lors du scénario NM.</i>	62
<i>Tableau 7 : Table du peuplement lors du scénario BAU.</i>	65
<i>Tableau 8 : Table du peuplement lors du scénario CCmoy.</i>	68
<i>Tableau 9 : Table du peuplement lors du scénario CCmoy + DF.</i>	71
<i>Tableau 10 : Table du peuplement lors du scénario CCforte + DF.</i>	74
<i>Tableau 11 : Contribution, en surface terrière, des essences introduites en 2020, dans les différents scénarios.</i>	77

## 1. INTRODUCTION

La forêt, du latin *forestis silva*, occupe environ un tiers de la planète, soit 4.06 milliards d'hectares, dont 9% sont situés au Canada (Dauzat, Dubois, et Mitterand 1971; FAO 2021). La sylviculture, désignant « l'ensemble des techniques permettant la création et l'exploitation rationnelle des forêts, tout en assurant leur conservation et leur régénération », est la définition-même de l'intervention de l'homme dans les massifs forestiers (Merlet et Berès 2003). En 2020, la forêt primaire, soit sans intervention humaine, représentait 1.11 milliard d'hectares, dont plus de la moitié se trouve au Brésil, au Canada et dans la Fédération de Russie. Celle-ci a été réduite de 81 millions d'hectares, depuis 1990 (FAO 2021).

Conséquemment aux activités anthropiques depuis la révolution industrielle, les dérèglements climatiques sont tels qu'il n'est plus possible de se baser sur les évolutions passées pour l'établissement de modèles prédictifs (Lindner et al. 2010). Bien que les perturbations futures sont difficilement prévisibles, le rapport de 2014 du GIEC<sup>1</sup> prévoit une incapacité d'adaptation de nombreuses espèces végétales et animales aux changements climatiques auxquels elles devront faire face (Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015). Ces dérèglements induisent une tendance à l'inversion, où le rôle joué par les forêts dans la lutte contre les changements se voit réduit face aux conséquences ressenties par celles-ci.

La gestion forestière s'articule autour de trois axes fondamentaux : le volet social, économique et écologique. Dans un contexte de changements climatiques grandissant, la gestion de la forêt se caractérise comme adaptative et en lien avec les menaces qui pèsent sur celle-ci (FAO 2021). Dans une perspective de durabilité, le sylviculteur est tenu de maintenir un équilibre entre ces différentes fonctions. Ce type de gestion, dite multifonctionnelle, conduit à la notion de 'services écosystémiques'. Ces services sont offerts par la biodiversité, les processus écologiques, les écosystèmes et le support de l'activité humaine, dans le but d'améliorer le bien-être de l'humanité (Thompson 2011). Ainsi, la forêt joue un rôle économique en produisant des ressources ligneuses (bois) et non ligneuses (fruits, champignons,...), de biomasse et autres biens générant du profit. Elle constitue également un espace d'accueil et de loisir pour diverses catégories de public. Habitat d'une large gamme d'espèces, son rôle écologique se traduit notamment par la présence de biodiversité, par le maintien de cycles biogéochimiques et autres services écologiques tels que la formation et la conservation des sols (Dufrêne et Maebe 2017; Emberger, Larrieu, et Gonin 2015). La forêt assure également divers services

---

<sup>1</sup> GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

climatiques, tels qu'un potentiel de séquestration du carbone, refroidissement de la température atmosphérique par évapotranspiration, régulation des crues, purification de l'eau, etc.

Dans ce contexte changeant, la gestion forestière intègre comme nouvel objectif la résilience des forêts. La résilience forestière se caractérise par sa capacité d'adaptation et de résistance aux changements environnementaux. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des systèmes sylvicoles plus résistants et flexibles (Sardin, Bock, et Becquey 2008). Diverses stratégies d'adaptation peuvent donc être envisagées.

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer la résilience d'une érablière rouge, peuplement majoritaire du Centre-du-Québec, face à une tempête extrême, à l'aide de la modélisation. Cinq simulations de gestion sylvicole différentes seront réalisées à l'aide du modèle HETEROFOR, dans un contexte climatique pessimiste. Ces simulations participent à l'élaboration d'une réponse à la question :

*« Quelle stratégie sylvicole permet une meilleure résilience de l'érablière rouge du Centre-du-Québec, face à une tempête ? ».*

À cet effet, le mémoire sera structuré en cinq parties. La stratégie de recherche consiste en un résumé de la recherche appliquée pour ce mémoire. L'état de l'art posera le contexte des érablières rouges du Centre-du-Québec, des changements climatiques et tempêtes, de la résilience forestière, et des différentes techniques de gestion envisagées lors des simulations. Le matériel et méthode présentera le modèle HETEROFOR et les démarches réalisées pour la calibration du modèle, et pour la réalisation et analyse des simulations. Enfin, les résultats seront présentés de façon factuelle, et analysés en guise de discussion. La conclusion permet de clôturer les observations et interprétations des résultats, et d'introduire des pistes d'amélioration du projet.

## 2. STRATÉGIE DE RECHERCHE

Ce mémoire tente d'identifier les stratégies sylvicoles adaptatives pouvant être appliquées aux érablières rouges du Centre-du-Québec, face à une tempête en contexte de changement climatique. La gestion adaptative s'accompagne du concept de résilience forestière. La résilience est la capacité qu'a la forêt à répondre à une perturbation, et à récupérer face à cet évènement. La perturbation sera donc une tempête de grands vents, appliquée à un peuplement dont l'érable rouge est l'espèce majoritaire. Ce peuplement, d'une surface terrière initiale de 29.13 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>, a été spatialisé en 2020, avant toute intervention sylvicole et est situé à Saint-Bonaventure, au Centre-du-Québec (Cordero Montoya 2021).

Pour répondre à cette volonté d'identification de stratégies adaptatives, la modélisation a été utilisée. Cinq simulations ont donc été testées, au sein d'un modèle, HETEROFOR. Ce dernier est un modèle de croissance forestière individu-centré et basé sur les processus, permettant de simuler l'évolution de peuplements complexes (mélange d'espèces, structure irrégulière) en tenant compte de la gestion sylvicole et du changement climatique. Pour mener à bien ce projet de simulations, la première étape a été de paramétrer le stade de régénération au sein du modèle, pour les espèces présentes dans le peuplement. Une prise de mesures a donc été réalisée sur le terrain, afin de constituer une base de données, au stade de régénération, pour les espèces suivantes : Épinette blanche (*Picea glauca*), pin blanc (*Pinus strobus*), chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*), sapin baumier (*Abies balsamea*) et les peupliers faux-tremble et à grandes-dents (*Populus tremuloides* et *Populus grandidentata*) dont les relations sont considérées comme identiques. Ces données rassemblaient une large gamme de hauteur, croissance de l'année et d'exposition à la lumière. Elles ont permis l'élaboration de diverses paramétrisations pour des relations de croissance. Ces paramètres ont été insérés au sein d'HETEROFOR, afin de le calibrer.

Une fois ces données prises sur le terrain, la régénération au sol a été évaluée au sein du peuplement initial. Cela revient à identifier la proportion de chaque essence dans différentes cohortes de hauteur. Cette démarche a permis d'installer une cohorte de régénération dans le peuplement, lors de l'initialisation dans HETEROFOR.

Le peuplement initialisé, cinq scénarios ont été testés. Un premier scénario de Libre évolution (NM) a été pris comme référence. Pour les quatre autres scénarios, les mêmes coupes ont été réalisées, basées sur la sylviculture traditionnelle appliquée dans ce type de forêt. Trois scénarios impliquent un enrichissement avec de nouvelles espèces, face à un scénario sans enrichissement, appelé le Business as usual (BAU). Les enrichissements ont toujours été constitués de deux espèces, en vue d'augmenter la

résistance aux changements climatiques de façon moyenne (CCmoy) pour le premier scénario, de réaliser la même stratégie, en augmentant également la diversité fonctionnelle (CCmoy + DF), ou en augmentant de façon forte l'adaptation aux changements climatiques, en augmentant également la diversité fonctionnelle (CCforte + DF). Ces cinq scénarios ont été testés pendant 79 ans dans HETEROFOR, suite à quoi ils ont été soumis à une tempête. Leur récupération a ensuite été évaluée sur 30 ans. Le scénario climatique utilisé pour les simulations est le scénario RCP8,5 du GIEC, correspondant à un profil où aucun effort n'aura été fait pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. La résilience forestière a été évaluée pour le peuplement lors de ces cinq scénarios, dans le but d'identifier lequel permet une meilleure adaptation face à la tempête.

### 3. ÉTAT DE L'ART

Ce mémoire s'engage dans une réflexion portant sur les méthodes sylvicoles visant à accroître la résilience des érablières rouges du Centre-du-Québec, face aux changements climatiques, et plus particulièrement face à une tempête, comme évènement extrême. Ainsi, il convient en premier lieu de procéder à une présentation approfondie de cette région et de ses forêts. Par la suite, il sera nécessaire de rappeler le contexte climatique global actuel et spécifique au Québec, avec une explication plus spécifique des tempêtes. Finalement, la méthode de gestion envisagée dans les scénarios sylvicoles sera présentée.

#### 3.1. LA RÉGION DU CENTRE-DU-QUÉBEC

Le Centre-du-Québec est une région administrative du Québec, province du Canada, localisée à la Figure 1. Elle est située dans l'hémisphère Nord. Selon la classification de Köppen-Geiger, la région du Centre-du-Québec se trouve dans un climat continental froid et humide (Dfb ; Beck et al., 2018). La température annuelle moyenne telle qu'enregistrée entre 1981 et 2010 varie entre 4,4 et 6,4°C (Guay-Picard et al. 2015a). Les précipitations moyennes annuelles sont de 861 mm de pluie et 232 cm de neige (Guay-Picard et al. 2015a). Le Centre-du-Québec s'étend sur une superficie de 7 261 km<sup>2</sup>. La région se trouve au sud du fleuve Saint-Laurent et est située entre les villes de Montréal et Québec. Elle est également positionnée sur deux provinces naturelles : Les Basses-terres du Saint-Laurent et les Appalaches septentrionales (Guay-Picard et al. 2015a).

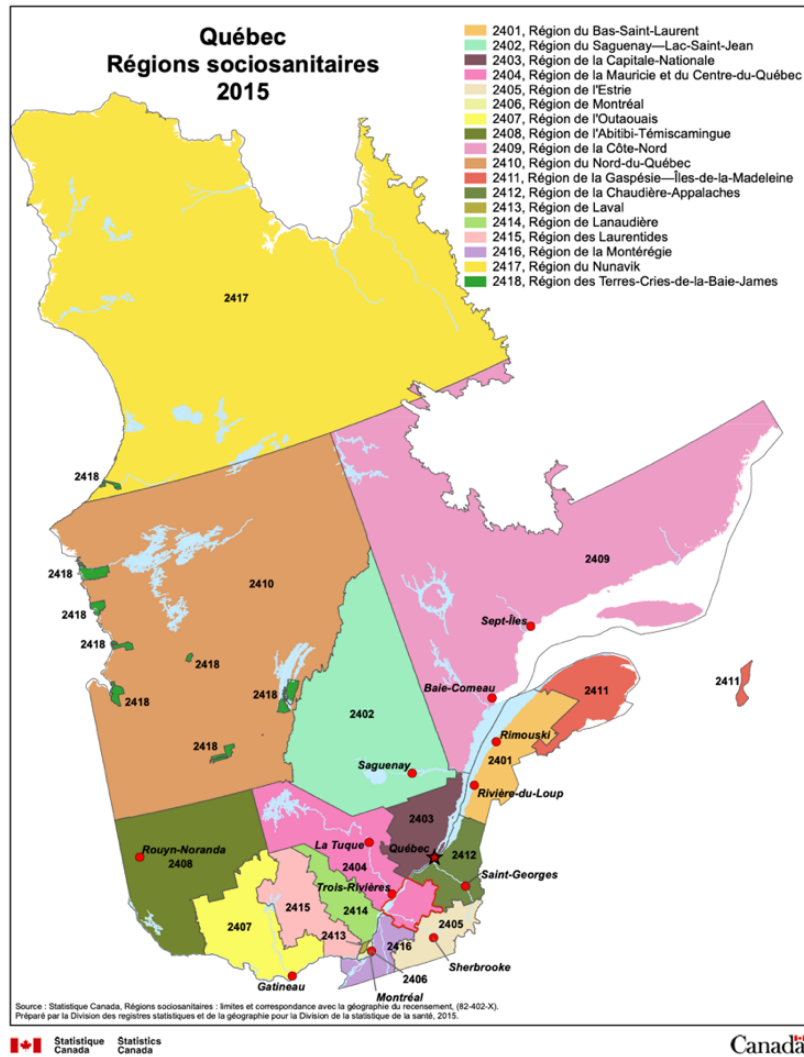


Figure 1 : Régions sociosanitaires du Québec (2015). La région du Centre-du-Québec, entourée en rouge, constitue le lieu de prise de mesures lors de la collecte de données.

### 3.2. PORTRAIT DES FORETS DU CENTRE-DU-QUEBEC

Le territoire forestier occupe plus de la moitié de la superficie du Centre-du-Québec (3 672 km<sup>2</sup>; Guay-Picard et al., 2015a). Selon l'inventaire de 2006 de l'Agence Forestière des Bois-Francis (AFBF), les deux couverts forestiers les plus abondants des terrains privés sont le couvert feuillu et mixte.

Le couvert forestier centricois est dominé par les espèces pionnières feuillues (peupliers, bouleau blanc et bouleau gris) et par les érablières rouges (dont l'essence majoritaire est l'érable rouge). La superficie de l'érablière rouge est la plus imposante, occupant 41% du territoire des forêts privées de la région, comme le démontre la Figure 2 (Guay-Picard et al. 2015b).

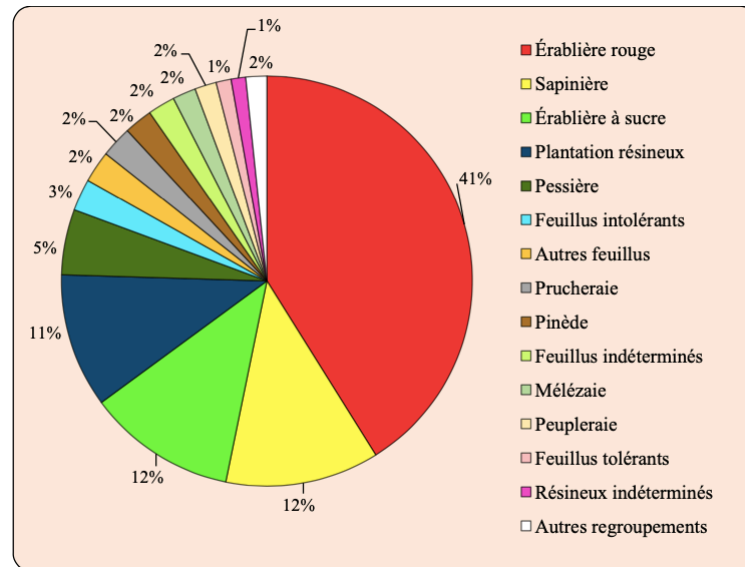


Figure 2 : Composition forestière (essences principales) des forêts privées : Centre-du-Québec (Guay-Picard et al., 2015b).

L'*Acer rubrum*, ou érable rouge, étant l'essence principale, elle se retrouve associée à diverses espèces dans ce type de couvert forestier, dont les suivantes ont été majoritairement observées sur le terrain : *Acer saccharum* (érable à sucre), *Abies balsamea* (sapin baumier), *Populus tremuloides* (peuplier faux-tremble), *Betula papyrifera var. papyrifera* (bouleau à papier), *Betula alleghaniensis* (bouleau jaune), *Pinus strobus* (pin blanc), *Picea glauca* (épinette blanche), *Quercus rubra* (chêne rouge).

Historiquement, des données sur le pollen fossile indiquent que l'érable rouge était déjà présent il y a 11 000 à 7000 ans, suite à une expansion vers le nord, en Amérique du Nord, durant la période la plus chaude de l'ère holocène (Zhang et al. 2015). Cependant, l'*Acer rubrum* n'était pas abondant dans les forêts anciennes et était majoritairement présent en peuplements non-mélangés (Walters, Yawney, 1990).

L'érable rouge témoigne d'une remarquable capacité de reprise suite à des événements tels que des feux ou coupes à blanc (Abrams 1998; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a; S. Walters et W. Yawney 1990). Or, depuis le début des années 1900, les coupes à blanc, brulis et défrichements ont pris une place importante dans la sylviculture du Centre-Du-Québec (Abrams 1998). Suite aux activités anthropiques et aux perturbations naturelles, l'érable rouge a été témoin d'une surexploitation durant le siècle dernier (Abrams 1998; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a). Suite à cette colonisation de l'érable rouge, il est aujourd'hui défini comme espèce envahissante et opportuniste. Par conséquent, l'abondance de cette espèce dans un peuplement induit un déclin de la biodiversité (Schuler 2004).

La carte de Cauboue en Annexe 1, présente l'aire de distribution native de l'érable rouge. L'espèce est naturellement présente dans les états de l'est des États-Unis, ainsi que dans le sud du Québec (Walters, Yawney, 1990). L'érable rouge est indigène dans la presque-totalité des domaines bioclimatiques du Québec et s'établit dans les conditions climatiques régionales (Gouvernement du Québec 2014b). Son abondance marque la limite entre le biome boréal et le biome tempéré observables dans l'est du Canada (Zhang et al. 2015).

L'érable rouge est disponible sur une grande amplitude écologique, et peut donc croître sur une large gamme de texture et de drainage de sol (Abrams 1998; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a). Bien qu'associé habituellement aux basses terres hydromorphes, sa croissance et sa qualité de tige semblent être stimulées dans les basses altitudes, sur un drainage bon à modéré (Abrams 1998; M. Burns et H. Honkala 2004; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a).

L'*Acer rubrum* est, en général, retrouvé en peuplements mélangés, accompagné d'autres feuillus ou résineux (Zhang et al. 2015). Dans la sylviculture du Québec, il dépasse rarement une moyenne de 80 ans (Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a). Bien que tolérant à l'ombrage au stade de jeune pousse, les besoins en lumière de l'érable rouge augmentent avec le temps (Bakuzis et Hansen 1965; Gouvernement du Québec 2014b; M. Burns et H. Honkala 2004; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a; OMNR 1997). C'est pourquoi sa croissance dépassera ses concurrents de façon opportuniste lors d'une ouverture de couvert (Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a).

L'érable rouge peut se reproduire par disamares ou par rejets (Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a). La dissémination des disamares ne se produit que sur la courte période d'un mois, de juin à début juillet (Houle 1994; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a). L'essence se renouvelant de façon abondante, une nouvelle cohorte de semis remplacera celle de l'année précédente, et grandira au stade de gaule dès une opportunité d'ouverture du couvert (Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a).

Le rejet est un moyen de reproduction abondant et vigoureux, qui se produit lorsque l'arbre a été endommagé (Ministère des Ressources Naturelles et al., 2013 ; Strong et al., 2006). Cette particularité permet à l'espèce de reconquérir l'espace qu'elle occupait sous le couvert dominant, durant les 7 ans suivant la coupe ou la perturbation (Fei et Steiner 2009). Elle prend également l'opportunité de redevenir dominante au cours de la troisième décennie du développement du nouveau peuplement (Fei, Steiner 2009). Il convient tout de même de noter que les arbres issus de rejets sont de nettement moins bonne qualité que les arbres issus de semis (Strong et al. 2006).

L'érable rouge offre une économie variée et étendue, tant au niveau régional qu'international. En fonction de la qualité du bois, il peut être destiné à la transformation en produits sciés ou utilisé pour la production de pâte à papier (Lupien 2004). Parallèlement, l'industrie du sirop d'érable rouge constitue une branche économique à part entière, bien que la teneur en sucre de sa sève soit inférieure à celle de l'érable à sucre.

L'érable rouge doit faire face à divers stress biotiques et abiotiques. Les ouvrages de Steil et al. (2009) et Abrams (1998) définissent sa résistance au vent comme élevée ou modérée, en raison de ses racines s'étendant en surface, principalement en stations mal drainées ou sur sols minces. Concernant les autres facteurs de stress, l'érable a une tolérance modérée au verglas, glace ou neige (M. Burns et H. Honkala 2004), à la sécheresse (OMNR 1998) et aux inondations ou remontées de nappe phréatique (OMNR 2000). Cependant, il présente une résistance faible à très faible au gel printanier tardif (Gu et al. 2008), à la compaction du sol (Pellegrin 1998) et est témoin d'une grande sensibilité face aux feux, bien que ceux-ci stimulent sa régénération (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2000).

L'Annexe 2 est composée de fiches décrivant les espèces accompagnatrices les plus fréquentes de l'érablière rouge.

### 3.3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GLOBAUX ET AU QUEBEC

En 1988, James Hansen, directeur de l'Institut Goddard pour les études spatiales de la NASA à New York City, évoquait pour la première fois le réchauffement climatique et l'effet de serre (Kerr 1989). Il était question d'évaluer pour la première fois l'impact des activités anthropiques, en pleine expansion depuis les années 1850, sur le climat et les écosystèmes terrestres. Ci-dessous, la Figure 3 démontre la différence d'évolution de la température globale moyenne, entre les phénomènes naturels et l'ajout de l'impact humain. Les activités anthropiques ont donc contribué à un réchauffement global de la planète, ainsi que des océans. Ce réchauffement est dû à une augmentation massive des concentrations de gaz à effet de serre, depuis la révolution industrielle (Berteaux 2014; Oliver et al. 2015; Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015; Richard P. Allan et al. 2021). Ces émissions proviennent principalement de la combustion d'énergies fossiles. La concentration de CO<sub>2</sub>, gaz de référence des émissions observées, s'élève aujourd'hui à environ 416 ppm, là où il n'était qu'à 280 ppm en 1850 (US Department of Commerce 2022; Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015). Si aucun effort n'est mené dans une optique de diminution des émissions de gaz à effet de serre, les écosystèmes terrestres et océaniques se verront victimes d'un déclin, et certaines espèces sont à l'aube

d'une disparition définitive (Berteaux 2014; Oliver et al. 2015; Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015; Richard P. Allan et al. 2021). Entre 1750 et 2011, le facteur ayant le plus impacté le réchauffement global était l'augmentation en concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique (Alexander et al. 2013).

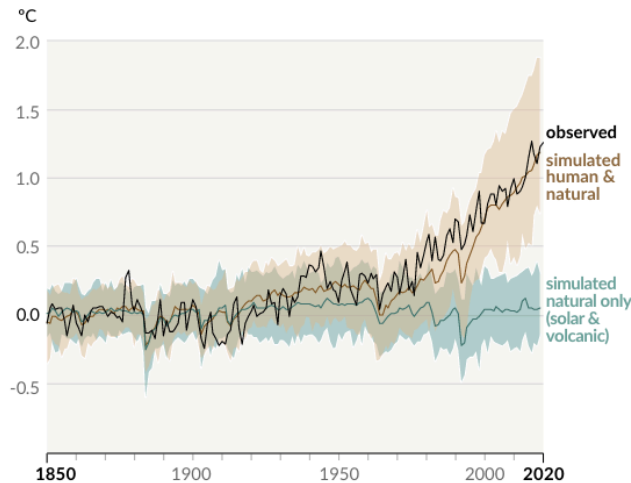


Figure 3 : Évolution de la température de surface globale (moyenne annuelle) observée et simulée selon des facteurs humains et naturels ou uniquement naturels (soleil, volcans). La courbe noire correspond aux températures moyennes observées entre 1850 et 2020. Les courbes brune et bleue sont respectivement les simulations du modèle CMIP6 selon la combinaison des facteurs humains et naturels, et seulement naturels, sur la même période. Les parties ombragées représentent la gamme de probabilité d'occurrence (repris de Richard P. Allan et al., 2021).

Le Québec est le siège d'un environnement très particulier car, étant situé sur une large gamme de latitudes et de longitudes, et jouissant de reliefs très contrastés, plusieurs climats y sont présents. Cependant, le Québec a bel et bien subi des conséquences du changement climatique à l'échelle nationale. En effet, une augmentation de la température moyenne annuelle du pays de 0,28°C par décennie a été enregistrée entre 1961 et 2005. D'autres conséquences, telles que l'augmentation des précipitations, un changement dans la durée de la saison de gel (diminution globale mais gelées tardives dans l'année) ou une hausse du niveau relatif des mers du Golfe du Saint-Laurent (est du Québec) ont pu être observés au cours du siècle dernier (Berteaux 2014).

Selon les scénarios climatiques prédictifs, les températures annuelles moyennes du Québec se verront sujettes à une augmentation de 1,9°C à 8,2°C, d'ici 2080 (Berteaux 2014). De façon générale, il est attendu que les différents climats de la province migrent vers le nord (Hutnik and Yawney, 1961; Ministère des Ressources Naturelles et al., 2013 ; Berteaux, 2014; Le Goff and Bergeron, 2014; Ouranos, 2010; Price et al., 2011). Cela signifie que les isothermes vont se déplacer vers le haut, induisant un réchauffement des différentes régions du Québec. Une incertitude pèse néanmoins sur leur vitesse de

migration, mais les modèles convergent sur le fait que certaines portions du territoire ressentiront les effets avec plus d'ampleur (principalement le nord). Le changement de températures devrait également induire une altération des saisons, avec des hivers plus doux et plus courts, et des étés plus longs et commençant plus tôt dans l'année. Il est également attendu que le Québec soit sujet à des événements climatiques extrêmes (fortes précipitations, tempêtes, feux de forêt, etc.) de plus grande magnitude et à une fréquence plus élevée que dans les dernières décennies (Berteaux 2014; Le Goff et Bergeron 2014; Ouranos 2010; Price et al. 2011).

### 3.4. MENACES ET PERTURBATIONS SUR LES FORETS

#### 3.4.1. IMPACTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR LA FORET

La forêt est le siège de divers processus et cycles biogéochimiques, tels que la photosynthèse, la formation des sols ou la séquestration du carbone (de Wergifosse 2021; Dufrêne et Maebe 2017; Forget et al. 2003). Cependant, les écosystèmes forestiers sont fortement impactés par les variations de température, de concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, de disponibilité des nutriments et du régime hydrique (de Wergifosse 2021; Forget et al. 2003; Reed et al. 1992).

La photosynthèse, processus nécessaire à la croissance des plantes chlorophylliennes, consiste en la transformation de l'énergie solaire reçue par l'organisme, en énergie chimique. Ce procédé s'accompagne d'une absorption de dioxyde de carbone, et permet la production d'oxygène (Blankenship 2014). Selon ce principe, il est attendu que les espèces végétales sujettes à une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique réagissent par une intensification de leur photosynthèse, et donc de leur croissance. Ce phénomène a, en effet, déjà pu être observé, et a été dénommé l'« Effet fertilisant du CO<sub>2</sub> ». L'accroissement en disponibilité du CO<sub>2</sub> peut avoir des effets sur la phénologie des plantes, en augmentant la longueur de la période de végétation et s'accompagne d'une augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Reyer et al. 2015). La plus grande disponibilité en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère permet, notamment, une fermeture plus précoce des stomates et donc une meilleure économie en eau de l'arbre. Il convient cependant de noter que le CO<sub>2</sub> n'est pas le seul facteur permettant une croissance plus accrue de certaines plantes. Long (1991) a expérimenté le fait que l'effet fertilisant ne peut fonctionner en présence d'un autre facteur environnemental limitant, tel que la température, l'incapacité de la plante à capter l'excès de CO<sub>2</sub> ou une contrainte nutritionnelle. Dans un contexte où la seule condition environnementale ayant changé est la concentration en dioxyde de carbone, accompagnée d'un effet limitant de la disponibilité en nutriments, la croissance des plantes n'est que peu impactée, voire nullement modifiée (L. Hartwell, T. Baker, et J. Boote 1997; Long 1991).

L'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pourrait donc sembler annonceur d'un avenir prometteur pour les forêts sous l'influence des changements climatiques. Mais il a déjà démontré un impact négatif. Un exemple est l'augmentation de la surface foliaire des plantes, accentuant donc les impacts d'une sécheresse sur celles-ci (Reyer et al. 2015). Le réchauffement global annoncé par les différents scénarios climatiques s'accompagnera de sécheresses plus intenses et plus fréquentes, ainsi que d'une modification des régimes de précipitations (de Wergifosse 2021; Périé 2014). Ces deux phénomènes pourraient entraîner un déficit hydrique, créant un stress chez les plantes, pouvant mener à leur dépérissement (André et al., 2019; Pachauri et al., 2015).

Plusieurs études ont pu démontrer que le facteur ayant le plus d'impact sur les massifs forestiers du Québec est la température (Berteaux 2014; Périé 2014). La section précédente (point 3.3) annonçait comment les différents climats du Québec risquent de se déplacer vers le nord. Lorsqu'un climat est déjà limitant pour les espèces qui y sont installées, un tel changement pourrait rendre le milieu complètement hostile à la survie des espèces (Berteaux 2014). Trois réponses sont possibles face à une montée en latitude des isothermes. La première est que certaines espèces pourraient naturellement s'adapter au nouveau climat et prospérer dans cet environnement. Malheureusement, les scénarios prédisent une probabilité de dépassement des limites d'adaptation des espèces. Cela induirait donc la deuxième réponse, une grande mortalité, avec un risque de perte d'écosystèmes et de biodiversité (Berteaux 2014; Drever et al. 2006; Le Goff et Bergeron 2014; Oliver et al. 2015; Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015; Périé 2014). Finalement, un phénomène de migration des espèces végétales (et animales) est attendu au Québec, créant une nouvelle dispersion des essences (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Berteaux 2014; de Wergifosse 2021; Forget et al. 2003; Le Goff et Bergeron 2014; Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015; Périé 2014). McKenney et al. (2007) anticipent un déplacement des habitats de plus de 700 km, correspondant à une diminution moyenne de 12% de l'aire de répartition de 130 espèces d'arbres de l'Amérique du Nord (Le Goff et Bergeron 2014). Ce déplacement des aires de répartition a déjà pu être observé au Québec, durant les dernières décennies (Berteaux 2014; Chen et al. 2011; McManus et al. 2012). Même si les modèles s'alignent sur cette migration d'espèces, les scénarios climatiques les plus pessimistes (bien que réalistes) prévoient une incapacité d'adaptation ou de déplacement assez rapide des espèces au cours des changements attendus lors du XXI<sup>e</sup> siècle (Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015).

Un autre facteur de risque lié aux changements climatiques, et particulièrement à l'augmentation des températures et des épisodes de sécheresse, est l'expansion des

organismes pathogènes (Lindner et al. 2010). En effet, il a déjà été observé que certains parasites profitent de la vulnérabilité des espèces arborescentes, lors de grandes vagues de chaleur, pour les attaquer de façon plus virulente. Il est également attendu que de nouveaux pathogènes, parasites ou espèces envahissantes s'introduisent au Québec.

Les forêts du monde et du Québec semblent donc sujettes à de grosses modifications dans leurs cycles de vie. Cependant, les changements climatiques ne constituent pas la seule source de menaces pour les écosystèmes forestiers. L'expansion et le développement des activités anthropiques, telles que la construction de routes, l'urbanisation ou encore l'agriculture rendent les forêts susceptibles à la fragmentation et ne sont pas sans impact sur celles-ci (Drever et al. 2006). Cela peut créer des lacunes dans la production de biens et de services par la forêt, ainsi qu'une perte en biodiversité (Drever et al. 2006).

### 3.5. LES TEMPÊTES

Une tempête est une perturbation atmosphérique se manifestant par de grands vents, souvent accompagnée de pluie, de neige, ou d'autres précipitations, ainsi que par des orages (Schuck et Schelhaas 2013). En 2021, plusieurs tornades de force égale ou supérieure à 2 sur l'échelle Fujita améliorée (ce qui correspond à des vents allant de 181 à 252 km/h ; US Department of Commerce, s. d.) ont causé d'importants dommages au Québec (Gouvernement du Canada 2021). Bien que l'avenir climatique soit incertain, il en reste néanmoins prévisible. Une hausse des événements extrêmes, en lien avec les changements climatiques, est attendue. Parmi ceux-ci, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes menace les forêts, en général (Forget et al. 2003; Le Goff et Bergeron 2014; Lindner et al. 2010; Peterson 2000; Potterf et al. 2022). C'est la raison pour laquelle ce phénomène climatique a été sélectionné pour ce mémoire, dans le but d'identifier les réponses d'un peuplement forestier face à un tel événement, à l'aide du modèle HETEROFOR.

#### 3.5.1. FACTEURS DE RISQUES POUR LES PEUPELEMENTS

Les tempêtes sont des phénomènes naturels climatiques et imprévisibles. Cependant, plusieurs facteurs influencent l'évolution de la tempête au sein d'un peuplement, et participent à la vulnérabilité de celui-ci face au vent. Les caractéristiques intrinsèques de la tempête sont le facteur prépondérant dans l'évaluation des risques qui lui sont associés (Colin et al. 2008; Meredieu et al. 2014; Schuck et Schelhaas 2013). Les dommages causés par la tempête seront déterminés par sa fréquence, son intensité ainsi que par son type (Colin et al. 2008; Meredieu et al. 2014; Schuck et Schelhaas 2013). Les aspects de l'arbre individuel modifient sa vulnérabilité face au vent. Les trois dimensions principales influençant la résistance de l'arbre sont sa hauteur, son diamètre et son espèce

(le poids et la forme de sa tige et de son houppier, sa densité racinaire, etc. ; Meredieu et al., 2014; Potterf et al., 2022). Ainsi, sa résistance à la casse ou au déracinement dépendra de son mécanisme spécifique et de son diamètre (Gardiner 2021; Schuck et Schelhaas 2013). Par exemple, un arbre présentant un système racinaire profond aura plus de stabilité qu'un arbre à système racinaire superficiel (de Wergifosse 2021; Le Goff et Bergeron 2014). Bien que ces composantes soient liées et exercent une influence les unes sur les autres, plusieurs modèles statistiques ont démontré une plus grande probabilité de dommages causés par une tempête, avec une plus grande hauteur de l'arbre (Colin et al. 2008; Gardiner 2021; Schuck et Schelhaas 2013). Jackson et al. (2019) insistent sur le fait que les arbres acquérant une grande hauteur rapidement, et donc ayant un facteur d'élancement (hauteur/diamètre) plus élevé, ont plus de risques que ceux dont la croissance en hauteur est moins rapide. De la même façon, la densité foliaire modifie le cours du vent, et donc son impact (Schuck et Schelhaas 2013). L'impact des dommages causés par une tempête dépend également du caractère spécifique du site où se trouve le peuplement (Colin et al. 2008; Gardiner 2021; Meredieu et al. 2014; Potterf et al. 2022; Schuck et Schelhaas 2013). Colin et al. (2008), et Le Goff & Bergeron (2014) considèrent qu'un sol superficiel (moins profond) ou gorgé d'eau augmente les risques pour le peuplement face au vent. La fertilité et le type de sol (texture, profondeur...) influencent la pénétrabilité des racines (Potterf et al. 2022). Donc, un sol moins facilement pénétrable rendra l'arbre moins stable et plus vulnérable au déracinement (Gardiner 2021). Un arbre affecté par un organisme pathogène sera également plus propice aux dégâts suite à la perturbation (Colin et al. 2008). Paradoxalement, une tempête rend également l'individu plus fragile, et donc plus apte à se faire attaquer par un pathogène (Forget et al. 2003).

À l'échelle du peuplement, sa gestion ainsi que celle des peuplements voisins et la structure de celui-ci peuvent avoir de grands effets sur le déroulement de la tempête en son sein (Schuck et Schelhaas 2013). Les arbres modifient, en effet, les champs de vitesse et l'intensité des turbulences, grâce à la structure verticale du peuplement et à la surface foliaire (Colin et al. 2008). Le vent profite donc des espaces vides pour alimenter sa vitesse et son intensité (Gardiner 2021). Cela peut être observé, par exemple, suite à une éclaircie trop forte, ou suite à des chablis (Colin et al. 2008; Gardiner 2021).

Les dégâts sur la forêt, suite à une tempête, peuvent être répartis selon trois dimensions temporelles. Sur le court terme, les dégâts peuvent, premièrement, consister en des incidents mineurs sur les feuilles, les branches ou le tronc, dont l'arbre finira par guérir (Gardiner 2021). L'arbre peut également finir par se casser, se courber ou par devenir un chablis (Dupont, David, et Brunet 2015; Schuck et Schelhaas 2013). Dans le nord-est et le centre-nord de l'Amérique du Nord, le chablis est la perturbation majeure des forêts (Canham, Papaik, et Latty 2001; Forget et al. 2003). Les dommages causés aux

arbres durant la tempête influencent sa vulnérabilité sur le moyen-terme (quelques jours à quelques mois). En effet, l'arbre endommagé reste sensible. Une tempête survenant proche d'une autre pourrait donc causer plus de dégâts que la première. Enfin, les impacts d'une tempête sur le long terme se marquent par une croissance diminuée des arbres d'un peuplement forestier (Gardiner 2021; Peltola et al. 2000). Les forêts constituant un stock de carbone important, la perte de branches, la mortalité des arbres et leur perte de croissance suite à une tempête impactent de façon conséquente le cycle du carbone terrestre (Jackson et al. 2019).

### 3.6. LA RÉSILIENCE FORESTIERE

La **résilience** est un concept difficile à définir et dont il existe une variété de définitions sociales, économiques et scientifiques. En 1973, Holling introduisait ce concept comme une mesure de la persistance des systèmes et de leur habilité à absorber un changement et une perturbation, en maintenant les mêmes relations entre populations et variables d'état. Pour Scheffer (2009), c'est la capacité d'une forêt à absorber les perturbations et à se réorganiser en cas de changement pour maintenir un fonctionnement et une structure similaires. Berteaux (2014) et Messier et al. (2019) la définissent dans un contexte de changements climatiques comme la capacité d'un système écologique ou humain à absorber les perturbations, et à revenir à un état initial, tout en conservant l'essentiel de ses structures et de son fonctionnement. Bhaskar, Arreola, Mora, et al. (2017) définissent également la résilience comme la capacité d'un système à tolérer un facteur de stress externe et à continuer de fonctionner au fil du temps. Malgré ses différentes définitions, la résilience définit le fait que les écosystèmes forestiers ont la capacité de tendre vers de nouveaux états lorsqu'un seuil critique est dépassé (Bryant et al. 2019; Reyer et al. 2015). Elle peut être mesurée par la magnitude de la perturbation qu'un système peut absorber sans subir de changements considérables (Drever et al. 2006). Bien que ce terme dépasse le concept des changements climatiques, il a pris de l'importance dans ce domaine. Il représente donc une clé utile à l'analyse de la réponse d'un peuplement face à une perturbation (telle qu'une tempête, dans ce mémoire), et se définit selon diverses composantes.

Face aux perturbations dont sont victimes les écosystèmes forestiers, il devient important de pouvoir analyser leur **capacité adaptative**. Ce terme désigne leur faculté à diminuer les effets négatifs ou à tirer profit des effets positifs des changements climatiques (Berteaux 2014; Drever et al. 2006; Yi et Jackson 2021). Selon Yi & Jackson (2021), la capacité adaptative fait partie d'une des cinq composantes de la résilience, avec sa résistance, sa récupération, sa stabilité et sa vulnérabilité.

La **résistance** d'une forêt est sa capacité à absorber l'impact d'une perturbation (Bhaskar et al. 2017; Thompson 2011; Yi et Jackson 2021). Lors d'un évènement extrême, la résistance d'un massif forestier peut être définie selon des indicateurs. Par exemple, le nombre d'arbres sur pied restant à la suite d'une tempête. Un système ayant une bonne résistance à l'évènement verra son nombre légèrement diminuer, voire pas du tout. À l'inverse, une forêt non-résistante aura un grand nombre de chablis.

Le **taux de récupération** est la vitesse avec laquelle le système retournera à un état stable (Bhaskar et al. 2017; Oliver et al. 2015; Yi et Jackson 2021). La résistance et la récupération d'un système sont schématisées à la Figure 4. Les deux graphes du haut sont l'effet d'une bonne résistance face à la perturbation. Cela se traduit par une faible perte, à la verticale. Suite à cela, l'espace entre le moment où la perturbation a lieu et le moment où le système revient à l'état initial représente son **temps de récupération**, dont la pente de la droite est le **taux de récupération**. Les graphes de droite ont un taux de récupération rapide, par rapport à ceux de gauche où une récupération lente peut être observée. Ces exemples démontrent qu'un système pourrait avoir une très faible résistance à une perturbation, mais être tout de même résilient, en ayant un taux de récupération réduit, récupérant complètement de l'incident après un certain temps (Thompson 2011).

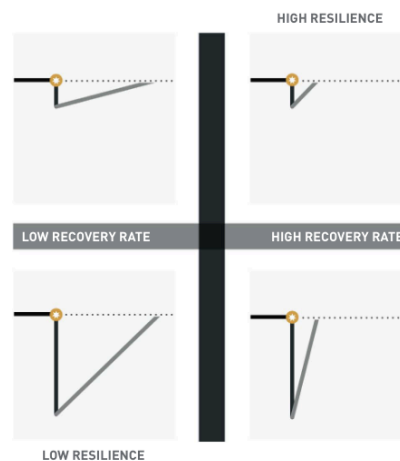


Figure 4 : Schéma conceptuel présentant la résilience, selon la résistance et le taux de récupération. L'étoile représente une perturbation, à la suite de laquelle la résistance peut être observée à la verticale (ligne noire verticale). Son taux de récupération, quant à lui, est la pente de l'indicateur (ligne grise), sur le temps que mettra la ligne grise à revenir à l'état initial (ligne en pointillés ; Extrait d'un schéma de Bhaskar et al., 2017).

L'une des deux autres composantes est la **stabilité**, qui correspond à l'habileté d'un système à maintenir ses fonctions et sa structure (Yi et Jackson 2021), concept opposé à la **sensibilité**, qui est le potentiel de changement d'un système, à la suite d'une perturbation (Berteaux 2014). La dernière composante, selon Yi & Jackson (2021) est donc la **vulnérabilité** d'un système, définie par son inhabileté à résister à la perturbation

(Yi et Jackson 2021), ou encore au degré auquel un système risque d'être affecté négativement par la perturbation (Berteaux 2014).

### 3.7. GESTIONS ADAPTATIVES

Les objectifs fondamentaux de la gestion forestière par l'humain répondent traditionnellement aux attentes sociétales (Messier et al. 2019). Toutefois, dans un environnement changeant, et dans un souci d'appréhension de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers, la simple répétition des techniques sylvicoles préexistantes ne suffit plus à garantir une préservation durable des forêts. Ainsi, une approche axée sur l'adaptation des écosystèmes forestiers et, par conséquent, sur leur résilience dans ces nouvelles conditions, s'est progressivement imposée dans le domaine de la sylviculture moderne (Messier et al. 2019). De la même façon, le rôle des forêts dans l'atténuation des changements climatiques, notamment par le stockage de carbone, prend progressivement place au sein des aménagements forestiers (Messier et al. 2019). En 2022, Messier et al. appelaient à la prise de conscience mondiale, sur le passage du rôle de sauveur à victime des forêts, face aux changements climatiques. Il est déjà arrivé que les forêts du Canada soient devenues source nette de carbone, dans les années 2000, résultant d'épidémies d'insectes, de feux et autres événements découlant des changements climatiques (Messier et al. 2022). Afin de ne pas reproduire ce phénomène, il convient de réduire les émissions de carbone fossile, et d'adapter l'aménagement forestier (Messier et al. 2022). Malgré la diversité des approches de gestion adaptative visant à renforcer la résilience des écosystèmes forestiers et la pluralité d'opinions convergentes et divergentes à ce sujet, les peuplements irréguliers mélangés et l'enrichissement par la plantation suscitent un intérêt croissant, dans la lutte contre les changements climatiques.

#### 3.7.1. LES PEUPELEMENTS IRRÉGULIERS MÉLANGÉS

Parmi les services rendus par la forêt à la société, la production de bois était celui au cœur des aménagements et des techniques sylvicoles, jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle (Messier et al. 2021). Pour un bois de bonne qualité, et pour assurer de gros volumes commerciaux, une homogénéité dans les peuplements forestiers s'est créée par la mise en place de systèmes réguliers et par la mécanisation des interventions sylvicoles. Ce n'est que plus tard que de nouvelles fonctions ont été associées à la forêt, telles que le maintien de la biodiversité ou le stockage du carbone, allant de pair avec une vision des peuplements forestiers comme étant des systèmes adaptatifs (Messier et al. 2019; 2021). Avec ces nouvelles visions de la forêt, un passage de futaies équiennes (dont les arbres ont sensiblement le même âge) et monospécifiques (composées d'une seule espèce) à des peuplements irréguliers (présentant des arbres répartis dans plusieurs classes d'âge)

mélangés (composés de plusieurs espèces) est introduit dans la sylviculture moderne (Messier et al. 2019).

Les peuplements irréguliers mélangés s'intègrent dans une gestion forestière visant la production de bois d'œuvre de qualité, tout en assurant un renouvellement continu et une stabilité écologique (Baar 2005; Martin et al. 2020). Idéalement, ce type de peuplement présente tous les stades de croissance et est constitué d'au moins deux espèces différentes (Martin et al. 2020; Pardos et al. 2021). Les peuplements irréguliers mixtes ont déjà démontré un potentiel impliqué dans la gestion durable (Sardin, Bock, et Becquey 2008; Messier et al. 2019). C'est, en effet, l'un des outils du sylviculteur pour l'adaptation face aux changements climatiques, conférant une meilleure stabilité et résilience de l'écosystème forestier face et suite à un événement perturbateur (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Martin et al. 2020; Sardin, Bock, et Becquey 2008).

Le caractère irrégulier mélangé des peuplements leur confère une gamme de bénéfices environnementaux. Structurellement, une hiérarchie spatiale verticale est créée par l'étagement des hauteurs et des strates de végétation, ainsi qu'une organisation horizontale en termes de diamètres variés, offrant un abri latéral (Martin et al. 2020; Sardin, Bock, et Becquey 2008). Par conséquent, ce type de gestion promeut le maintien d'un couvert végétal continu (Martin et al., 2020; Mason, 2002). Le couvert continu permet de manipuler l'une des composantes essentielles des peuplements irréguliers mélangés : la lumière. L'hétérogénéité permet une gamme de lumière contrastée au sein du peuplement au fil du temps, et assure donc le renouvellement continu par une meilleure gestion du sous-étage (Ligot, Balandier, Schmitz, et Claessens 2020; Mason 2002; Messier et al. 2019; Sardin, Bock, et Becquey 2008). La régénération constitue, en effet, un facteur de résilience des forêts, à condition qu'elle soit sagement diversifiée et que cette diversité puisse être maintenue sur le long terme (Ligot, Balandier, Schmitz, Petit, et al. 2020). De plus, la régénération assure un rôle instantané à finalité économique et de résilience, car elle permet un gainage naturel des fûts, limitant le développement de formations épicromiques (Sardin, Bock, et Becquey 2008).

Le mélange d'espèces peut être gouverné selon les exigences des différentes essences. En effet, ayant des besoins contrastés en lumière, eau et nutriments, des mécanismes de coexistence se créent de façon interspécifique (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Mina et al. 2022). Un phénomène appelé 'facilitation racinaire' définit une meilleure répartition des ressources et une redistribution hydraulique active entre les individus (Martin et al. 2020; Pardos et al. 2021). En diminuant la concurrence pour l'eau et les nutriments entre les individus, le peuplement devient plus résistant à la sécheresse

et permet également une prise de relais d'une espèce plus résistante, lorsqu'une autre, vulnérable, subit un stress, par exemple hydrique (Martin et al. 2020; Pardos et al. 2021).

La complexité induite par la gestion irrégulière mixte rend les peuplements moins vulnérables aux changements climatiques et aux attaques d'insectes et maladies (André et al. 2021; Messier et al. 2019; 2021). L'assurance écologique fournie par la diversité est due, notamment, aux différences fonctionnelles entre les espèces, indiquant une probabilité plus élevée de retrouver des espèces résistantes au stress (Messier et al. 2019). Cela se traduit par une diversification des réponses possibles face à un stress ou une perturbation, facilitant la coexistence d'espèces, dans des conditions de vie stressantes (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Pardos et al. 2021). En outre, une espèce différencie son comportement lorsqu'elle se trouve en mélange, plutôt qu'en conditions monospécifiques (Colin et al. 2008; Messier et al. 2019; Pardos et al. 2021). En effet, en mélange, une essence peut devenir résistante, neutre ou encore vulnérable au stress (Pardos et al. 2021; Drever et al. 2006).

En termes de production de biens et services écosystémiques, il a déjà été prouvé que les peuplements mixtes sont en moyenne plus productifs que les monospécifiques (Messier et al. 2019). De plus, les mélanges sont mieux adaptés pour fournir plusieurs services écosystémiques (Messier et al. 2019). Économiquement, la gestion en irrégulier mélangé améliore l'installation, la croissance et la qualité des bois produits et permet une diversification des sources de revenus et une meilleure adaptation à l'évolution du marché (Sardin, Bock, et Becquey 2008). Cependant, ce type de gestion est plus complexe à entretenir, à exploiter, et est parfois moins facilement commercialisable sur les marchés standardisés actuels (Messier et al. 2021; Ponette 2021).

Face aux tempêtes, une meilleure stabilité des peuplements mélangés a déjà pu être observée. Mason (2002) reprend plusieurs événements de tempêtes, notamment la tempête Lothar en 1999, où des niveaux statistiquement plus bas de dégâts ont été observés dans les peuplements irréguliers mélangés en Europe de l'Ouest. Colin, Brunet, Vinkler, & Dhôte (2008) rappellent cependant que cela dépend de la stabilité des essences et de leurs proportions. Lorsque la tempête s'abat sur une forêt mixte, la présence de différentes espèces, offrant des niveaux de stabilité variés, limite le risque de destruction totale des peuplements (Colin et al. 2008). Divers mécanismes entreraient en jeu dans la réduction de la vulnérabilité du peuplement face au vent. Ainsi, une plus forte interpénétration des houppiers réduit l'écoulement du vent au sein d'un mélange (Colin et al. 2008). De la même façon, la stratification verticale offre une meilleure qualité d'ancrage et influence l'exposition au vent des différentes espèces (Colin et al. 2008). Enfin, comme une attaque d'agents pathogènes rend un individu plus vulnérable au vent,

la réduction des attaques induite par le mélange d'espèces intervient indirectement dans la stabilité du peuplement face aux tempêtes (Colin et al. 2008).

Bien que les mélanges d'essences et l'irrégularisation des peuplements soient un atout majeur dans la lutte contre les changements climatiques, les avantages des peuplements mixtes ne sont pas à généraliser, car ils dépendront du choix et de la qualité du mélange, ainsi que du site, des biomes et des conditions climatiques (Colin et al. 2008; Gazol et Camarero 2016; Granda, Gazol, et Camarero 2018; Messier et al. 2019; Pardos et al. 2021).

### 3.7.2. ENRICHISSEMENT : ESSENCES RÉSISTANTES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'enrichissement prend place dans le renouvellement du peuplement. En effet, les arbres au stade de régénération seront les plus propices à subir des changements de climat, et à potentiellement vivre dans un nouveau biome (Spittlehouse et Stewart 2003). Or, avec le réchauffement global, un déclin des espèces adaptées au froid est attendu, alors que les espèces plus tolérantes à la chaleur et à la sécheresse survivront certainement plus facilement (Oliver et al. 2015). La résilience des espèces provient, en outre, de leur habilité à persister sous une vaste gamme de températures et de conditions climatiques (Thompson 2011). C'est pourquoi il est intéressant de repérer des espèces plus résistantes aux changements climatiques, afin de les planter artificiellement dans des forêts où elles n'étaient initialement pas présentes (Le Goff et Bergeron 2014; Messier et al. 1999). Cela permet un enrichissement de la forêt actuelle, et cette méthode suit les concepts de la **migration assistée** des espèces. Comme il est attendu que la plupart des espèces végétales ne s'adaptent pas suffisamment rapidement à la migration des climats, la migration assistée des espèces est une réponse à ce manque d'adaptation, par une meilleure plasticité du système (Martin et al. 2020). Elle consiste en le déplacement de populations d'espèces (dans ce cas-ci végétales) par l'Homme, en dehors de leur aire de répartition (Berteaux 2014; Messier et al. 2019). Cela peut se traduire par une aide dans la plantation et la propagation de génotypes plus adaptés au nouveau climat (Spittlehouse et Stewart 2003).

Une fois les essences identifiées et plantées, il est nécessaire de gérer la compétition (Berteaux 2014; Spittlehouse et Stewart 2003). Cette troisième partie du travail démontre que la migration assistée des espèces ne présente pas que des avantages. Plusieurs conséquences peuvent, en effet, résulter de cette technique. La première est la migration conjointe de ravageurs et agents pathogènes. Si des espèces forestières sont déplacées, il existe un risque pour les populations déjà présentes d'apparition de nouveaux herbivores ou pathogènes (Berteaux 2014). Un autre risque est l'invasion de la nouvelle espèce, suite à son installation trop expansive (Berteaux

2014; Spittlehouse et Stewart 2003). Cela va de pair avec l'absence de pathogènes ou ravageurs en lien avec cette espèce dans son nouvel environnement (Berteaux 2014).

Bien que la migration assistée semble scientifiquement nécessaire, elle rentre finalement dans un débat éthique reposant sur le droit et le devoir de manipuler la répartition d'espèces sauvages et des processus naturels (Berteaux 2014). Dans ce contexte, cette technique se doit d'être manipulée avec soin, rigueur et précaution.

### 3.7.3. ENRICHISSEMENT : LA DIVERSITÉ FONCTIONNELLE

Dans la continuité des gestions adaptatives face aux changements climatiques, il a été démontré que la diversification des traits fonctionnels dans un peuplement augmente sa résilience (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Drever et al. 2006; Gazol et Camarero 2016; Granda, Gazol, et Camarero 2018; Messier et al. 2019; Mina et al. 2022; Oliver et al. 2015; Thompson 2011). Les traits fonctionnels d'une espèce sont définis par Messier et al. (2019) comme toute caractéristique biologique facilement mesurable et influençant les performances d'un individu en termes de croissance, de survie ou de reproduction de l'espèce. Les traits fonctionnels d'un arbre, pouvant lui conférer des caractéristiques de résistance aux perturbations, sont sa hauteur, sa structure et densité du bois, la taille de ses graines, sa surface foliaire spécifique, sa capacité de repousse, l'épaisseur de son écorce et la profondeur de son enracinement (Messier et al. 2019). Dans une volonté d'enrichissement d'un écosystème forestier, les espèces présentes peuvent être classées en groupes fonctionnels selon les similitudes de leurs traits fonctionnels (Messier et al. 2019).

Gazol & Camarero (2016) expliquent une meilleure résistance des peuplements diversifiés par une réduction de la concurrence, due à une plus grande complémentarité des niches écologiques. Les niches écologiques sont liées aux traits fonctionnels et décrivent leurs différentes façons d'acquérir les ressources. Cela réduit donc la compétition interspécifique et rend la coexistence des essences plus stable.

Une forêt résiliente doit donc présenter des espèces aux traits fonctionnels divers et complémentaires, capables de s'adapter au spectre de stress le plus large possible, par la diversification des possibilités d'adaptation (André, de Wergifosse, et Jonard 2019; Drever et al. 2006; Granda, Gazol, et Camarero 2018; Le Goff et Bergeron 2014; Messier et al. 2019; Mina et al. 2022; Pardos et al. 2021). Par ailleurs, la performance de l'écosystème dépend de la présence d'espèces dans tous les groupes fonctionnels nécessaires (Drever et al. 2006). En effet, certaines espèces, et groupes d'espèces remplissent des fonctions clés dans la forêt et leur maintien permet de conserver la multifonctionnalité de celle-ci (Thompson 2011). Or, la perte d'une espèce représentant un groupe fonctionnel spécifique peut entraîner une baisse de résilience et engendrer de

grosses répercussions sur l'écosystème (Oliver et al. 2015; Thompson 2011). Afin d'éviter de tels dégâts, le concept de 'redondance fonctionnelle' a été mis en place. Cette technique permet une récurrence dans les traits fonctionnels, en incluant diverses espèces de mêmes groupes fonctionnels (André et al., 2019 ; Messier et al., 2019; Oliver et al., 2015). Cela permet de conserver des traits essentiels à l'équilibre de l'écosystème en cas de perte d'une espèce suite à une perturbation (André, de Wergifosse, et Jonard 2019).

Pour une forêt plus résiliente, il convient donc d'assurer la présence de multiples groupes fonctionnels, ainsi qu'une redondance des traits assurés par les différentes essences (Messier et al. 2019; André, de Wergifosse, et Jonard 2019). Le sylviculteur peut donc introduire ce concept par un enrichissement par la plantation dans une volonté de rendre un peuplement plus résilient.

#### 3.7.4. ACTIONS ET LÉGISLATION AU QUÉBEC

Afin d'avoir une idée de la législation au Québec concernant les différentes méthodes de gestion adaptative, certaines d'entre elles sont présentées en Annexe 3.

### 3.8. METHODE DE GESTION SYLVICOLE ET DE RENOUVELLEMENT ENVISAGEE

Le peuplement étudié est géré sous des normes sylviculturales typiques des peuplements irréguliers mélangés du Centre-du-Québec.

La sylviculture appliquée dans la forêt étudiée du Centre-du-Québec est la **coupe progressive irrégulière (CPI)**, décrite dans le 'Guide sylvicole du Québec' du Ministère des ressources naturelles, qui sera la référence pour ce chapitre (Raymond et al., 2013). Cette approche de gestion forestière vise à maintenir un couvert d'arbres matures, tout en favorisant l'installation et la croissance de la régénération. Elle convient particulièrement aux essences (semi-) tolérantes à l'ombrage et est adaptée aux peuplements irréguliers. La coupe progressive irrégulière ne nécessite pas de coupe finale. Un de ses intérêts se base sur sa proximité avec la dynamique naturelle des écosystèmes. En outre, elle favorise l'augmentation de la biodiversité et permet une modulation flexible de la structure verticale, horizontale et du sous-étage forestier.

La CPI demande des interventions de coupe sur plus de 1/5 de la révolution. Cela étale la révolution sur environ 90 ans, avec une intervention tous les 30 ou 40 ans (voire tous les 15 ans si nécessaire). Chaque intervention se fait majoritairement dans les étages supérieurs, dans le but d'installer une nouvelle cohorte de régénération naturelle sous le couvert. Il est donc attendu de se retrouver habituellement avec deux à quatre classes d'âges, représentées par les différentes cohortes. Le taux de prélèvement s'élève environ à un tiers du capital sur pied.

Il est possible de mener la CPI selon trois variantes, à finalité différente. La première est la CPI par trouées agrandies. Elle consiste en l'intervention par trouées, nécessaires à l'installation de la régénération. Ces trouées seront progressivement agrandies lors de chaque intervention. La résultante de ce mode de gestion est une structure monoétagée à l'endroit de la trouée, mais multiétagée à l'échelle du peuplement. La seconde variante est la CPI à régénération lente. Sa particularité est la conservation d'au moins deux classes d'âge dans la régénération, sur plus d'1/5 de la révolution. C'est pourquoi elle est définie comme accueillant une période de régénération allongée. Finalement, la dernière variante est celle utilisée lors des scénarios sylvicoles menés dans HETEROFOR : la CPI à couvert permanent. Cette gestion est assez libre, car les interventions peuvent se faire par groupes, par pied d'arbre ou par trouées. Elle est, en effet, régie par les besoins et la protection de la régénération sous-couvert. Il est possible de viser deux à quatre cohortes d'âges différents, et elle ne comporte pas de coupe finale. Théoriquement, ses interventions peuvent se faire tous les 30 ans, bien qu'il ait été choisi d'intervenir tous les 40 ans lors des simulations.

## 4. MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 4.1. DESCRIPTION DU MODELE HETEROFOR

#### 4.1.1. CHOIX DU MODELE ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

HETEROFOR (pour FORêts HETEROgènes) est un modèle permettant d'étudier la résilience des forêts face aux changements globaux. En simulant la croissance individuelle des arbres au sein de peuplements irréguliers, HETEROFOR est un outil d'aide à la décision dans la gestion forestière durable. Le modèle est hébergé par Capsis, un logiciel de modélisation et de simulations, dédié à la croissance forestière. Capsis est une plateforme collaborative permettant aux utilisateurs de définir des scénarios de gestion, de les simuler, et d'en analyser les résultats. Elle est bâtie sur des prédictions d'évolution naturelle des essences forestières, relatives à leurs traitements sylvicoles et à la compétition inter-espèces (Dufour-Kowalski et al. 2012).

MAESPA, BALANCE ou des modèles tels que ceux d'iLand permettent également de simuler les dynamiques forestières. Cependant, le choix d'utiliser HETEROFOR se base sur les différents modules qui le composent, permettant une représentation complexe et poussée des flux et mécanismes liés à la croissance forestière et à l'allocation des ressources (eau, lumière, nutriments, etc.). De plus, le modèle étant individu-centré, il offre une structure représentative en trois dimensions du peuplement forestier, basée sur la position et les caractéristiques de chaque arbre, individuellement (de Wergifosse et al. 2020; Jonard et al. 2020). Le choix de ce modèle se traduit également par son module réservé aux tempêtes. En effet, HETEROFOR possède la capacité de simuler une tempête, et les dommages causés par celle-ci, permettant une analyse préventive de différentes techniques sylvicoles et évitant ainsi de faire un nombre incalculable de tests sur le terrain.

#### 4.1.2. DESCRIPTION DES MODULES

HETEROFOR est composé de différents modules interconnectés : le bilan radiatif, le bilan hydrique, le flux de carbone et croissance dimensionnelle, la phénologie, le module de régénération et le module de tempête (de Wergifosse et al. 2020; Jonard et al. 2020). La Figure 5 expose la dynamique des modules interconnectés, qui composent HETEROFOR.

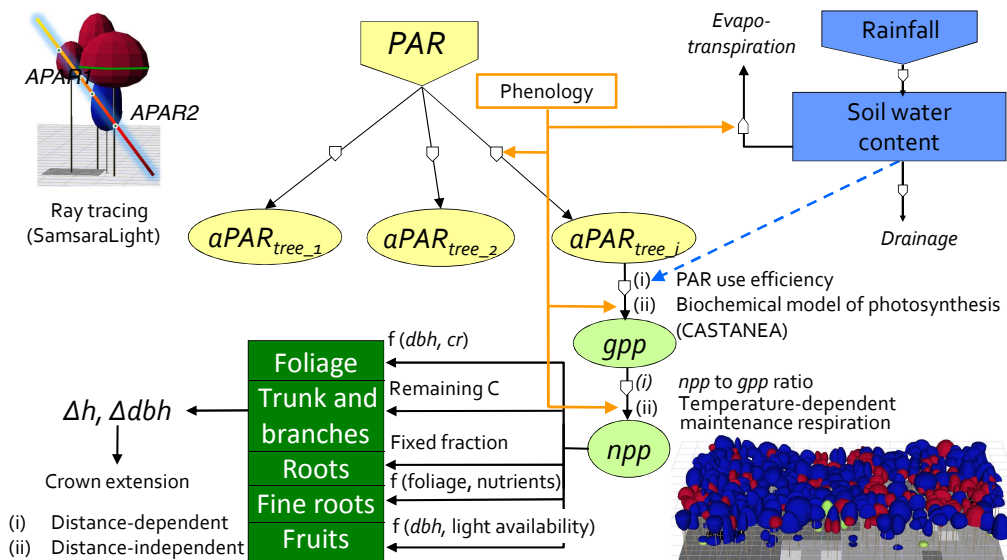


Figure 5 : Diagramme conceptuel du modèle HETEROFOR (tiré de : Jonard et al., 2020). Le bilan radiatif est représenté en jaune, avec PAR, le rayonnement incident, qui sera absorbé par chaque arbre ( $aPAR_{tree}$ ). Le bilan hydrique est en bleu, représentant les flux d'eau provenant des précipitations, allant jusqu'au drainage du sol et à l'évapotranspiration du peuplement. Le module des flux de carbone et de croissance dimensionnelle, permettant d'utiliser le rayonnement et l'eau perçus pour calculer la Production Primaire Brute et Nette ( $gpp = PPB$  et  $npp = PPN$ ), et d'ainsi évaluer la croissance des arbres, est en vert. Enfin, le module phénologique est en orange, et permet la simulation des variations de l'état du feuillage des différents individus.

## Bilan radiatif

Le bilan radiatif est simulé, au sein du modèle, en utilisant la bibliothèque SAMSARALIGHT. Cette dernière offre la possibilité de reconstituer le cheminement du rayonnement solaire à travers la canopée du peuplement, sur base de données météorologiques représentatives du site. Par conséquent, le rayonnement solaire est subdivisé en énergie interceptée par les arbres individuels ou par certaines parties de ceux-ci, ainsi qu'en rayonnement perçu au niveau du sol. La composante de rayonnement perçu au sol est quantifiée en fonction du rayonnement reçu par chaque cellule d'une grille régulière au sol (André et al. 2021).

## Bilan hydrique

Le bilan hydrique tel qu'élaboré dans HETEROFOR s'appuie sur la répartition des flux d'eau provenant des pluies incidentes, à l'échelle de l'arbre et du peuplement, selon un pas de temps horaire. Ce bilan fait état de l'interception des précipitations par les feuilles, le tronc (notamment l'écoulement le long du tronc vers le sol) et au sol. Il prend également en compte le pluviollessivat et le drainage du sol, ainsi que l'évapotranspiration du peuplement (évaporation du sol et des arbres et transpiration, directement liées à l'éclairement reçu ; de Wergifosse et al., 2020).

## **Flux de carbone et croissance dimensionnelle**

Ce module est fondamental dans l'élaboration de la croissance des arbres et de leur hiérarchie d'allocation du carbone. Il permet, sur base du rayonnement et de la pluviométrie reçus, de calculer la Production Primaire Brute (PPB, en g de carbone par m<sup>2</sup> par an) de la plante, qui peut ensuite être convertie en PPN (Production Primaire Nette, en g de carbone par m<sup>2</sup> par an) en fonction des caractéristiques de l'arbre, de la compétition avec ses voisins et de la température de l'air. Cette dernière variable est ensuite répartie dans les différents compartiments de l'arbre, permettant d'estimer un accroissement en hauteur et en diamètre de l'individu. Finalement, le modèle prédit l'extension de la couronne de l'arbre pour décrire la dynamique des cimes, en tenant compte ou non de la concurrence locale. Lors de l'évolution du peuplement, la mortalité et l'abattage des arbres sont également considérés, afin de simuler une évolution représentative de la réalité (Jonard et al. 2020).

## **Phénologie**

Le module phénologique, bien que facultatif dans HETEROFOR, permet de simuler la variation temporelle de l'état du feuillage d'un arbre au cours de sa période de végétation. Une simulation plus précise des flux d'énergie, d'eau et de carbone au sein de l'écosystème forestier est rendue possible via ce module. La biomasse foliaire est estimée suivant six étapes phénologiques dans le modèle. Ces étapes sont propres à chaque espèce, et dépendent des conditions météorologiques. L'Annexe 4 décrit ces différents stades pris en compte dans le modèle.

## **Régénération**

La régénération naturelle d'un peuplement pouvant être d'une densité largement supérieure à celle des arbres plus âgés, HETEROFOR permet l'installation de cohortes de régénération, dans des cellules quadrillées de 10 x 10 m. En effet, il serait irréaliste de localiser chaque semis individuellement. À cet effet, il est possible de définir un nombre de cohortes d'espèces de diverses classes de hauteur (de maximum 10 à 12 mètres, stade de passage à la futaie), ainsi que leur densité, sous le peuplement. Une périodicité peut être activée dans l'apparition de la régénération naturelle (par exemple, en demandant la réapparition d'une certaine cohorte tous les cinq ans), et des plantations peuvent être réalisées à tout moment, dans les simulations. Une multitude d'équations allométriques permettent la paramétrisation de ce module, en liant la hauteur et le diamètre des semis à la transmittance et aux attributs morphologiques des espèces. La survie de chaque semis est également déduite des PPB et PPN globaux de chaque classe de taille, mis en relation avec le rayonnement disponible par semis (Guignabert et al. 2023).

## Tempêtes

Dans une optique de simulations de gestions adaptatives face aux perturbations environnementales, un module de tempête a été développé dans HETEROFOR. Ce module permet d'identifier les dégâts et la mortalité auxquels un peuplement pourrait faire face suite à une tempête, en se basant sur les vitesses de vent critiques de chaque arbre. La vitesse de vent critique est la vitesse au-delà de laquelle un arbre sera endommagé par déracinement ou casse de la tige. Les vitesses critiques sont calculées pour chaque arbre selon ses caractéristiques (hauteur, diamètre, résistance à la flexion, poids de la couronne) et selon la compétition avec ses voisins. Un deuxième volet calcule la vitesse de rafale, au sommet de chaque arbre. Après la tempête, un arbre est considéré comme mort ou tombé lorsque la vitesse critique est inférieure à la vitesse de rafale qu'il subit. Des dommages sur les arbres voisins sont également possibles, et il est considéré qu'un arbre à proximité est mort s'il est plus petit et qu'il se retrouve dans la zone de chute de l'arbre tombé, illustrée à la Figure 6. Un impact sur la régénération d'une cellule est également pris en compte, selon la proportion de la surface de houppier tombé dans une cellule donnée.

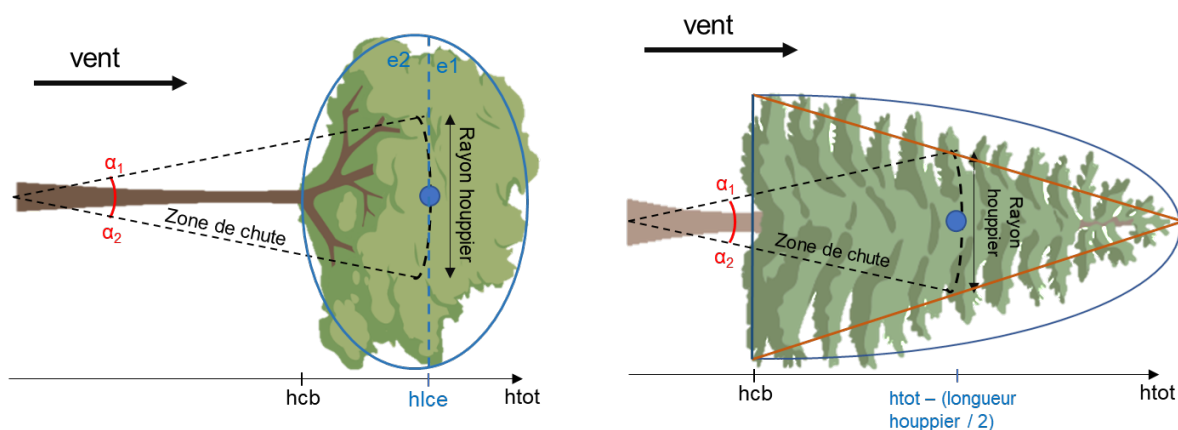


Figure 6 : Schéma conceptuel d'impact de la chute d'un arbre feuillu ou résineux, dans HETEROFOR. Trois conditions impliquent la mort d'un arbre voisin à un arbre tombé. La première est qu'ils doivent se trouver à une distance inférieure à  $h_{cb}$  pour les feuillus et à  $h_{tot}/2$  pour les conifères. De plus, sa hauteur doit être inférieure au  $4/5$  de la hauteur de l'arbre tombé. Enfin, l'arbre sera considéré comme mort s'il est situé dans la zone de chute (délimitée par les angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ).

## 4.2. CALIBRATION DU MODULE DE REGENERATION

### 4.2.1. JEUX DE DONNEES

#### 4.2.1.1. ÉCHANTILLONNAGE DES SEMIS

Une campagne de mesures a été réalisée dans le but d'obtenir des données de terrain pour calibrer l'équation déterminant la croissance en hauteur en fonction de la

lumière et d'ajuster, si nécessaire, les paramètres existants des relations entre la hauteur et le diamètre au collet. Cinq espèces cibles ont donc été sélectionnées, afin d'être échantillonnées, considérant des conditions d'éclairément et de hauteur de plant variables. La hauteur totale des individus inventoriés n'excède pas les 6 mètres. Ils font donc partie du stade de régénération tel que défini dans le modèle (<10 mètres). Les espèces sélectionnées sont les suivantes : *Picea glauca*, *Pinus strobus*, *Quercus rubra*, *Abies balsamea* et *Populus tremuloides*. Ce choix est justifié par la présence habituelle de ces espèces dans les érablières rouges du Centre-du-Québec. Le Tableau 1 référence la totalité de l'inventaire et les caractéristiques minimales et maximales des semis mesurés. Le *Quercus macrocarpa* et le *Carya cordiformis* font également l'objet d'un court inventaire, car peu présents sur le terrain, mais ne seront pas utilisés de façon individuelle.

Tableau 1 : Liste des espèces mesurées pour la calibration du module de régénération du modèle HETEROFOR. Les cinq premières constituent celles dont une équation spécifique à l'espèce sera calibrée. Les deux autres espèces seront utilisées uniquement pour les équations génériques, par manque de données à leur sujet.

Espèce (français)	Espèce (latin)	Nombre de données	Hauteur [cm]	Diamètre [cm]	Lumière reçue [% tot]
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i>	69	[15 ; 530]	Non mesuré	[8.13 ; 100]
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i>	71	[14 ; 528]	[0.3 ; 8]	[11.37 ; 100]
Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>	71	[15.5 ; 500]	[0.2 ; 4.7]	[6.2 ; 63.29]
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i>	100 <sup>2</sup>	[17.3 ; 398]	[0.4 ; 6]	[5.78 ; 93.36]
Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i>	63	[28 ; 530]	[0.2 ; 3.4]	[2.11 ; 92.41]
Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i>	35	[16,5 ; 168]	[0.2 ; 1.4]	[10.13 ; 55.19]
Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i>	10	[27 ; 108]	[0.4 ; 1.1]	[19.63 ; 46.94]

<sup>2</sup> Comme il a pu être observé sur le terrain, le sapin baumier est une espèce très tolérante à l'ombrage. Cela lui confère la capacité d'être dominé par d'autres espèces durant plusieurs années, et donc de, parfois, présenter des pousses à l'année très petites. Cette caractéristique induit une large gamme d'âge possible pour une même hauteur, et donc une marge d'erreur plus grande. Cela a pu être observé lors du test statistique, où la relation de hauteur observée s'éloignait trop de celle prédite. C'est la raison pour laquelle plus de données ont été collectées pour le sapin baumier, afin de réduire l'incertitude (Truax 2021; Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013a).

Deux types de mesures ont été effectuées pour la caractérisation des semis : les mesures dendrométriques et l'acquisition de photographies hémisphériques.

Les mesures dendrométriques suivantes ont été prises en juillet et août 2022, sur les semis des espèces-cibles : la hauteur totale, le diamètre au collet, la pousse de l'année et de l'année précédente, à l'aide d'un mètre. Pour les arbres trop grands, la hauteur totale et les pousses ont été mesurées à l'aide d'un vertex. La croissance de l'individu sur les deux dernières années peut être visible à l'aide de nœuds sur la tige qui délimitent la pousse annuelle. Celle correspondant à l'année actuelle peut donc être mesurée depuis l'apex du plant jusqu'au premier nœud, et la suivante correspond à l'entre-nœud suivant.

La disponibilité en lumière au-dessus de chaque individu a été déterminée à l'aide de photographies hémisphériques. Une photographie a donc été prise au sommet de chaque semis, à l'aide d'un appareil photo Nikon D3100, équipé d'une lentille hémisphérique sigma fisheye 4.5 mm f 2.8. Une telle lentille permet d'obtenir une vue de 360° de la canopée, lorsque la photo est prise à partir du sol de la forêt, vers le haut. À l'aide d'une boussole, l'appareil photo a été positionné de sorte que le haut des photos corresponde au nord magnétique. L'appareil était disposé à l'apex du plant, la lentille pointant vers le ciel, maintenu horizontalement sur une planche équipée d'un niveau. Cette technique a été privilégiée à un trépied car elle permet un gain de temps considérable et a été démontrée fiable pour les estimations de disponibilité en lumière sous couvert (Origo et al. 2017). Une fois les photographies prises, le traitement de celles-ci s'est fait avec le programme Gap Light Analyzer (GLA). GLA est une version moderne d'un programme d'analyse de photographies numériques du Dr. Charles Canham de l'Institute of Ecosystem Studies (IES), à Millbrook, dans l'État de New York. Celui-ci permet d'analyser des photographies numériques hémisphériques. Basé sur un système impliquant un modèle complexe de rayonnement solaire, ainsi que de divers utilitaires liés au traitement d'image et à l'autonomie de l'utilisateur, le programme effectue une dissociation entre les pixels considérés comme « ciel » et « non-ciel ». La distinction des pixels permet ensuite, via une combinaison avec le module de rayonnement solaire, de sortir des informations de transmission de la lumière et de structure du couvert (Frazer, Canham, et Sallaway 1999).

Bien que la prise de mesures des semis ait été réalisée aléatoirement dans la région du Centre-du-Québec, la majorité des données de terrain a été récoltée sur les sites du projet SylvAdapt. Cette étude vise l'intégration de nouvelles espèces pour l'adaptation des forêts face aux changements environnementaux (Doyon 2021). Pour cela, plusieurs sites ont été installés dans le Centre-du-Québec, présentant quatre gammes d'ouverture du couvert, et donc, des conditions d'éclairement variées (surface terrière de 6, 12, ou 20

m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> et parcelle témoin n'ayant subi aucune coupe). Les sites de SylvAdapt abritaient donc la diversité recherchée en termes d'espèces et d'éclaircissement.

#### 4.2.1.2. AUTRES JEUX DE DONNEES

Deux jeux de données précédemment récoltés ont été utilisés pour compléter les mesures prises lors de cette recherche.

Les données de régénération de l'inventaire de 2004 de M. Beudet, lors de la recherche sur la 'Modélisation des effets du jardinage de différentes intensités dans les érablières en Estrie' ont été utilisées pour l'élaboration d'équations génériques de croissance en fonction de la lumière des semis (Beudet 2004).

Les données de l'inventaire forestier du Québec, qui ont permis d'obtenir un premier jeu de paramètres pour les équations reliant le diamètre au collet et la hauteur des semis. Étant donné le très faible nombre de petits arbres dans ce jeu de données, il ne sera pas intégré à la calibration mais utilisé pour comparer les valeurs actuelles avec celles obtenues dans ce mémoire, afin de valider ou non les paramètres préexistants (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs 2023).

#### 4.2.2. MODÉLISATION DE LA RELATION 'ACCROISSEMENT – ECLAIREMENT' ET DES RELATIONS ALLOMETRIQUES ET DIMENSIONNELLES

La croissance des arbres est simulée au sein d'HETEROFOR à l'aide de diverses équations allométriques. Comme la régénération démontre une croissance différente du stade adulte, ces équations peuvent être calibrées pour les deux phases de croissance. Un fichier reprend donc les différentes essences, et les paramètres des équations associées à chacune d'elles. Dans le cas des espèces mesurées lors de cet inventaire, deux équations ont été calibrées. Cela signifie que les paramètres de ces équations ont été définis pour les différentes essences.

Une équation générique, incluant la tolérance à l'ombrage propre à chaque espèce, représentée ci-joint :

$$\Delta h = a + b\sqrt{h} \frac{1}{1 + e^{1 - \frac{\text{transmittance}}{c1+c2 \cdot SST}}} \quad (1)$$

Une équation sans tolérance à l'ombrage, qui sera calibrée pour l'ensemble des espèces (« équation générique sans tolérance à l'ombrage ») mais aussi spécifiquement pour les cinq espèces échantillonnées, sous la forme :

$$\Delta h = a + b\sqrt{h} \frac{1}{1 + e^{1 - \frac{\text{transmittance}}{c}}} \quad (2)$$

Avec  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c_1$  et  $c_2$ , des coefficients à paramétrer ;  $h$ , la hauteur initiale du plant (c'est-à-dire la hauteur du plant avant sa croissance de l'année) ;  $\Delta h$ , la croissance annuelle du plant, calculée en faisant la moyenne des deux dernières années de croissance; transmittance, la lumière transmise au plant et SST, l'indice de tolérance à l'ombrage spécifique à chaque espèce (issus de Humbert et al., 2007).

Il est intéressant d'avoir une équation générique, dans le but d'évaluer la croissance globale d'espèces non-inventoriées. La calibration se base sur une mise en commun des données de croissance de toutes les espèces mesurées sur le terrain, ainsi que celles du jeu de données complémentaire (Beudet 2004), afin d'évaluer au mieux la croissance moyenne d'un plant, indépendamment de son espèce. Cela permet, lors des simulations, d'enrichir le peuplement avec des espèces dont la croissance en hauteur juvénile n'a pas été spécifiquement calibrée dans le modèle.

Deux autres équations ont été paramétrées pour les semis :

$$h = a + b * dcol + c * (dcol)^2 \quad (3)$$

$$dcol = a + b * h + c * (h)^2 \quad (4)$$

Où  $h$  est la hauteur initiale du plant (avant la croissance annuelle), et  $dcol$ , le diamètre au collet de l'arbre.

Chacune des deux équations a été évaluée pour les espèces suivantes : le peuplier faux-tremble et peuplier à grandes dents (dont les équations sont les mêmes), le pin blanc, le chêne rouge, le sapin baumier et le chêne à gros fruits. Elles n'ont pas été caractérisées pour l'épinette blanche et pour le caryer cordiforme, par manque de données.

#### 4.2.3. CALIBRATION

La calibration est l'étape de validation des paramètres obtenus pour les différentes équations. Trois outils ont permis cette validation : Une analyse statistique pour les équations de croissance, une comparaison avec les anciens paramètres pour les équations de hauteur et de diamètre au collet et un test de simulation pour confirmer les dynamiques de croissance globale des espèces.

L'analyse statistique des paramètres pour les relations de croissance en fonction de la lumière est basée sur une régression linéaire comparant les données prédites et observées. Elle a été réalisée à l'aide du programme Rstudio, où la moyenne des croissances mesurées (deux dernières années) représente les données observées, et les équations nouvellement paramétrées fournissaient la prédiction. Divers indicateurs ont permis d'analyser les paramètres obtenus, présentés au Tableau 2.

Tableau 2 : Indicateurs utilisés pour l'analyse des régressions linéaires des paramètres obtenus<sup>3</sup>.

Indicateurs			
Indicateur	Formule / représentation	Valeur idéale	Explication
<b>Intercept</b>	Coordonnée où la régression linéaire rencontre l'axe vertical (x = 0).	0	Si le 0 fait donc partie de son écart-type, il sera considéré comme non-significatif.
<b>Pente</b>	$\frac{\Delta y}{\Delta x}$	1	Une pente de 1 considère que les valeurs prédites correspondent exactement aux valeurs observées.
<b>Model Efficiency (M.E.)</b>	$ME = 1 - \frac{\sum(P-O)^2}{\sum(O - moy(O))^2}$ P = Valeurs prédites O = Valeurs observées moy(O) = Moyenne des valeurs observées	1	Évaluateur des compétences prédictives du modèle. Comme la différence entre les valeurs prédites et obtenues est soustraite de l'unité, le modèle sera le plus efficace en étant proche de 1.
<b>p-valeur</b>	p-valeur sortie d'un test de Student dans R	0	Le test de Student est un outil statistique permettant d'évaluer si les prédictions diffèrent significativement des observations (Jmp, statistical discover, 2022). La valeur de probabilité (p-valeur, comprise entre 0 et 1) retourne la probabilité que les deux jeux de données sont identiques. Une p-valeur proche de 0 affirme donc une plus grande probabilité que les données observées correspondent à la prédiction.
<b>r de Pearson</b>	Coefficient de corrélation obtenu dans R	1	La corrélation de Pearson est utilisée pour évaluer la répartition des points. Un r de Pearson (compris entre -1 et 1) est optimal s'il est différent de 0, car il indique qu'il n'y a aucune corrélation entre les données. De plus, un r proche de 1 indiquera que les données prédites et observées varient ensemble dans le même sens, appuyant l'hypothèse de similarité entre les deux (Université de Liège, s. d.).

Les équations allométriques de hauteur et diamètre ont été comparées graphiquement avec les paramètres initialement utilisés dans le modèle HETEROFOR. Il est, en effet, possible de distinguer, sur graphique, si la courbe traduit bien la trajectoire des données d'observation. Ainsi, un choix peut être fait entre les équations anciennement utilisées dans HETEROFOR, et celles définies sur base des nouveaux paramètres obtenus.

Finalement, une dernière validation des paramètres a été réalisée, en simulant la croissance des différentes espèces, à partir d'une plantation fictive et sur une durée suffisamment longue pour permettre leur passage à la futaie. Cela permettait d'évaluer leur croissance dans un environnement météorologique, sylvicole et pédologique réaliste et de s'assurer de leur bonne évolution.

### 4.3. INITIALISATION DU MODELE

L'initialisation du modèle HETEROFOR est établie sur base d'un fichier inventaire importé par l'utilisateur. Celui-ci recense les caractéristiques de chaque arbre, ainsi que sa position, et peut également être initialisé pour la régénération présente sous le peuplement (Jonard et al. 2020). Un fichier météorologique basé sur des observations

<sup>3</sup> Sources citées : (Jmp, statistical discover 2022) et (Université de Liège s. d.)

passées ou sur des prédictions est également introduit dans HETEROFOR, pour caractériser l'environnement climatique du peuplement lors des simulations.

#### 4.3.1. SITE TÉMOIN

Un cas d'étude représentatif des érablières du Centre-du-Québec a été sélectionné pour initialiser les simulations. Le choix s'est porté sur un peuplement du dispositif SylvAdapt à Saint-Bonaventure (Centre-du-Québec), dont les coordonnées sont 45.98559°N, 72.6171°O (Figure 7). La parcelle s'étend sur 0,64 hectares, et a été spatialisée en 2020, avant toute intervention sylvicole, par R. Cordero Montoya (Cordero Montoya 2021). Le dispositif se trouve dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) de Drummond, sur la province naturelle des Basses-terres du Saint-Laurent, et fait plus particulièrement partie de la forêt de Drummond, comprise dans les 3% du territoire public du Centre-du-Québec (Guay-Picard et al. 2015a).

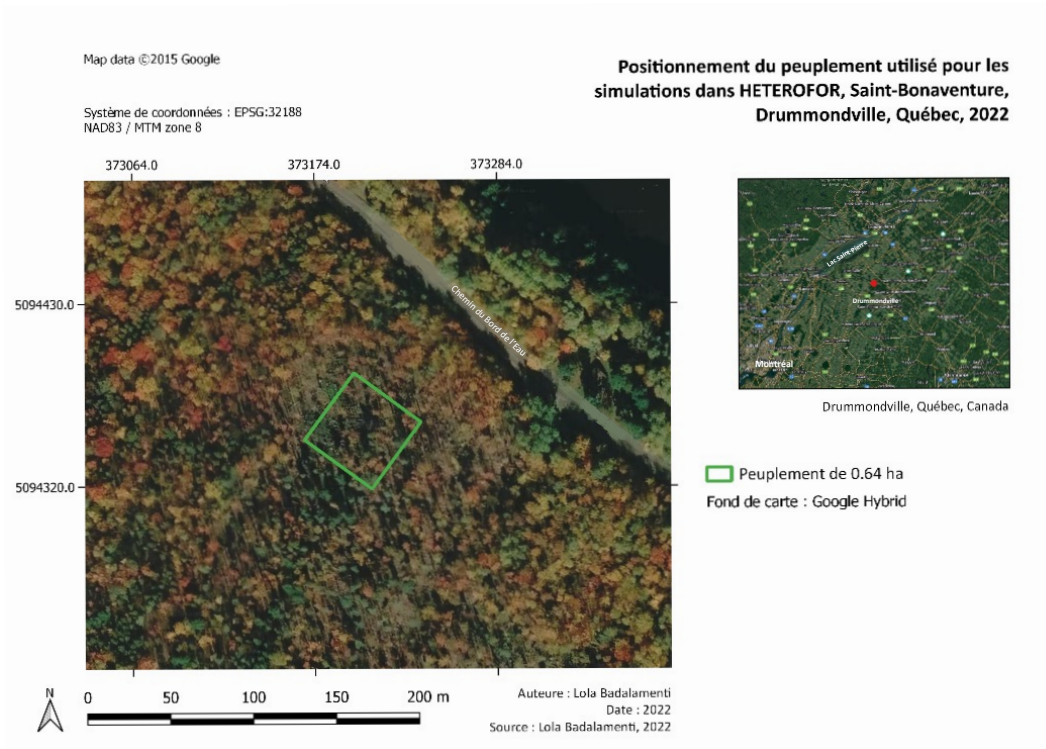


Figure 7 : Position du peuplement témoin sur le site de Saint-Bonaventure, dans le Centre-du-Québec (Canada).

#### 4.3.2. CARACTERISATION DU PEUPEMENT

##### 4.3.2.1. FUTAIE

Le peuplement sélectionné est composé de 459 arbres de futaie, avec une surface terrière de 29.13 m<sup>2</sup>/ha. L'érable rouge en est l'espèce principale, à raison de 18.07 m<sup>2</sup>/ha, accompagné, de l'essence la plus abondante à la moins représentée en surface terrière, de pin gris (*Pinus banksiana*), pin blanc (*Pinus strobus*), peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), bouleau à papier (*Betula papyrifera*), cerisier tardif (*Prunus serotina*) et de

sapin baumier (*Abies balsamea*). La répartition du nombre de tiges selon les classes de diamètre et de hauteur est présentée à la Figure 8.

Selon la sylviculture historique du Centre-du-Québec, l'érable rouge atteint sa maturité vers les 70-80 ans. Cela correspond à une hauteur allant de 18 à 27 mètres (S. Walters et W. Yawney 1990). Le graphe de la Figure 9 démontre une majorité de tiges d'érable rouge arrivant à hauteur d'exploitation.

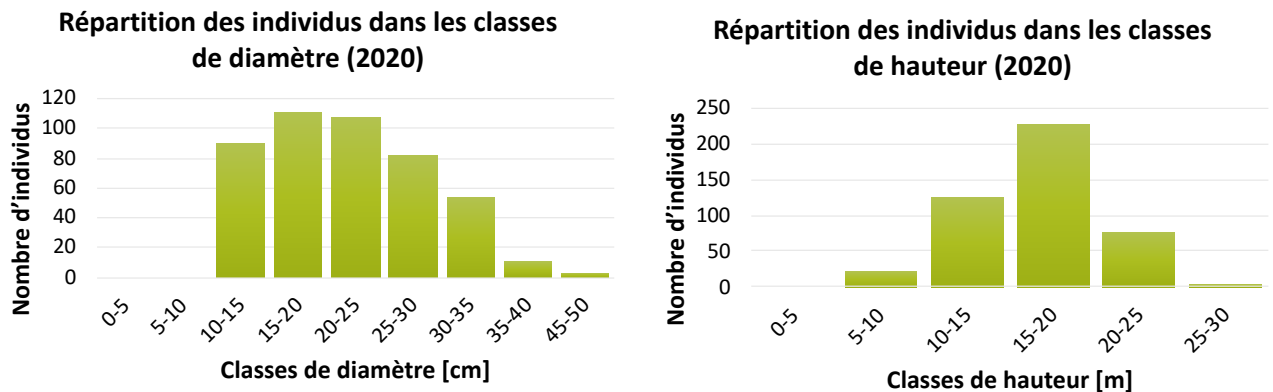


Figure 8 : Répartition du nombre d'arbres par classe de diamètre (gauche) et de hauteur (droite), dans le peuplement témoin initial (2020).

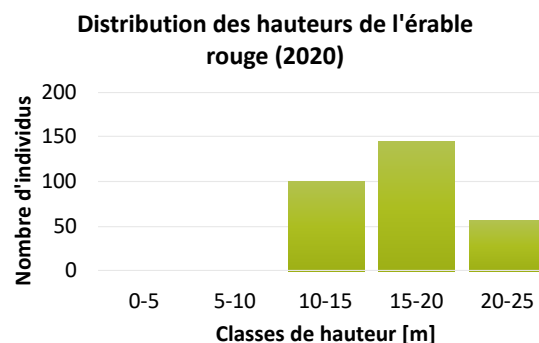


Figure 9 : Distribution des tiges d'érable rouge selon les classes de hauteur (2020).

#### 4.3.2.2. RÉGÉNÉRATION

Afin de caractériser la régénération présente dans le peuplement sélectionné pour initialiser le modèle, dix placettes de 3 mètres de rayon ont été installées. Deux zones témoins des dispositifs de SylvAdapt ont accueilli quatre placettes chacune. Les deux dernières ont été disposées dans la zone tampon séparant les deux carrés témoins. Leurs positions sont visibles à la Figure 10. Ce choix se justifie par l'absence de traitement sylvicole dans les zones témoins et tampon. Cela permet d'observer la régénération naturelle du peuplement, sans intervention du sylviculteur. De plus, le peuplement choisi pour les simulations se trouve à quelques mètres des placettes, dans les dispositifs SylvAdapt. La végétation observée est donc relativement représentative de celle sous le

couvert du peuplement. Logistiquement, le centre d'une placette était marqué à l'aide d'un piquet, auquel un mètre ruban était accroché, afin de délimiter 3 mètres de rayon. Un point GPS a été pris au centre de celle-ci. Un passage sur l'entièreté de la placette a ensuite été réalisé, afin de répertorier chaque espèce en cours de régénération présente sur celle-ci. La végétation adventice n'a pas été prise en compte. Deux classes de hauteur ont été considérées, sous et au-delà de 50 cm. La première a été quantifiée, et les plants de la troisième classe ont été mesurés précisément.

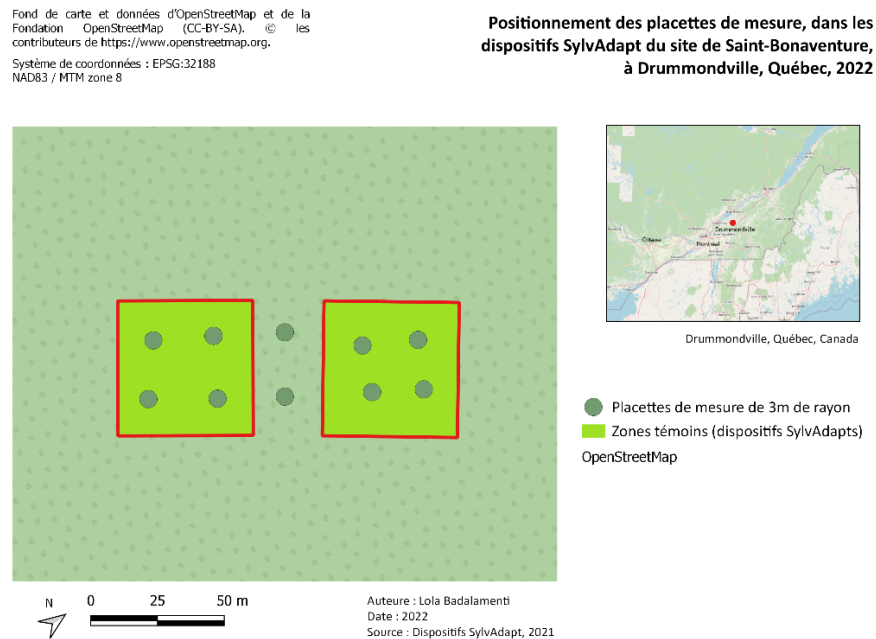


Figure 10 : Disposition des placettes de caractérisation de la régénération dans les dispositifs SylvAdapt.

Lors de l'initialisation du peuplement dans HETEROFOR, la régénération a donc été caractérisée sur base des relevés d'inventaire. Afin de garder une structure dans le sous-étage, trois cohortes ont été définies : Une de 60 cm de hauteur maximum, une entre 60 cm et 1 m de hauteur, et la plus haute au-delà de 1m de hauteur. Une périodicité a également été appliquée dans l'apparition de la régénération, en faisant revenir les cohortes de plus de 60 cm de hauteur, tous les cinq ans. Selon ces critères, le Tableau 3 présente les différentes espèces et leur abondance dans le peuplement. La surface totale des placettes inventoriées étant de 282.74 m<sup>2</sup>, la relation suivante a été utilisée, afin de savoir combien de semis se retrouvent dans les cellules de 100 m<sup>2</sup> de HETEROFOR :

$$\text{Nombre par cellule} = \frac{\text{Nombre total}}{\text{Surface totale}} \times 100 \quad (5)$$

Si les scénarios sylvicoles impliquent un enrichissement avec de nouvelles espèces, leur régénération sera modifiée deux fois (en 2050 et en 2090) selon la proportion (en surface terrière) des espèces de la futaie.

Tableau 3 : Inventaire de la régénération du peuplement initial (2020).

État de la régénération dans le peuplement				
Espèce	Classe de hauteur (cm)	Nombre total	Surface totale inventoriée (m <sup>2</sup> )	N/cellule HETEROFOR
Pin blanc	< 60	28		10
	60 - 100	4		1
Bouleau à papier	< 60	64		23
	60 - 100	3		1
Chêne rouge	< 60	6		2
	60 - 100	2	282,74	1
Érable à sucre	< 60	3		1
Érable rouge	< 60	7199		2546*
	60 - 100	14		5
Hêtre à grandes feuilles	> 100	6		2
Sapin baumier	< 60	3		1

\* Arrondi à 2500

#### 4.3.3. CARACTERISATION DU SOL ET DU CLIMAT DU PEUPEMENT INITIAL

Le centre du peuplement s'élève à une altitude de 71 mètres (topographic-map.com 2022). Il est caractérisé par un climat continental froid et humide et par une précipitation totale annuelle de 984 à 1039 mm et une température moyenne annuelle entre 5.1 et 5.5°C (Beck et al., 2018; MRN, 1998, référencé dans Guay-Picard et al., 2015). Le peuplement s'étend sur un sol sableux, à socle géologique ardoise et calcaire et à drainage modéré à imparfait (MRN, 1998 & BDTQ, RDE (MRNF), 2009, référencés dans Guay-Picard et al., 2015).

#### 4.4. SIMULATIONS

##### 4.4.1. PRINCIPES

En réponse à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des perturbations causées par les changements globaux, une gestion adaptative doit être envisagée (peuplements irréguliers, diversification, etc.) afin de rendre les forêts plus stables et plus résilientes. Les expérimentations de terrain permettent de tester divers scénarios sylvicoles et d'étudier certains effets connus des changements climatiques, mais celles-ci sont souvent coûteuses, complexes à installer et le nombre d'itinéraires techniques peut vite devenir important. La modélisation est donc un outil intéressant et rapide, pour répondre à cette problématique. Afin d'évaluer la résilience forestière de l'érablière rouge face à un événement de type 'tempête', cinq scénarios sylvicoles seront testés dans HETEROFOR, sur une période de 109 ans, sous un contexte de réchauffement climatique extrême.

#### 4.4.2. CLIMAT ET TENEUR EN CO<sub>2</sub>

Les changements climatiques seront pris en compte de deux façons dans les simulations. D'une part via le fichier météorologique, en utilisant un scénario climatique élaboré par le Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat (GIEC), et d'une autre en simulant une tempête comme événement climatique extrême, à l'aide d'un module dédié présent dans HETEROFOR. En 2015, sortait le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Dans ce rapport, quatre Profils Représentatifs d'évolution de Concentration (RCP) étaient présentés, chacun correspondant à un scénario de développement concernant les émissions et concentrations de gaz à effet de serre (GES), les émissions de polluants atmosphériques et l'affectation des terres, allant jusqu'à l'année 2100. Ainsi, le RCP2,6 correspond à un scénario optimiste d'atténuation, les RCP4,5 et RCP6,0 sont intermédiaires, et le RCP8,5 implique des émissions très élevées de gaz à effet de serre<sup>4</sup>. Les scénarios n'impliquant aucun effort de réduction des émissions de GES se situent entre le RCP6,0 et le RCP8,5 (Pachauri, Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat 2015).

Afin d'évaluer la réponse des peuplements face aux changements climatiques, cinq scénarios de gestion sylvicole seront simulés dans le scénario climatique RCP8,5. Représentant une évolution pessimiste du climat, ce scénario correspond à un forçage radiatif hypothétique de 8.5 W/m<sup>2</sup> d'ici la fin du siècle (van Vuuren et al. 2011). En termes d'augmentation de la température, le RCP8,5 évalue la différence à une hausse de 4°C pour 2100, par rapport à la période 1986-2005 (Ministère de la transition écologique de France 2021). La Figure 11 expose l'évolution de températures du scénario RCP8,5, comparé au scénario le plus optimiste, RCP2,6.

---

<sup>4</sup> En 2021, cinq nouveaux scénarios (Shared Socio-economic Pathways : SSP1-1.9 ; SSP1-2.6 ; SSP2-4.5 ; SSP3-7.0 ; SSP5-8.5) ont été proposés par le Giec (Richard P. Allan et al. 2021). Cependant, ceux-ci n'ont pu être utilisés pour les simulations dans HETEROFOR, par manque de données disponibles nécessaires pour les projections climatiques.

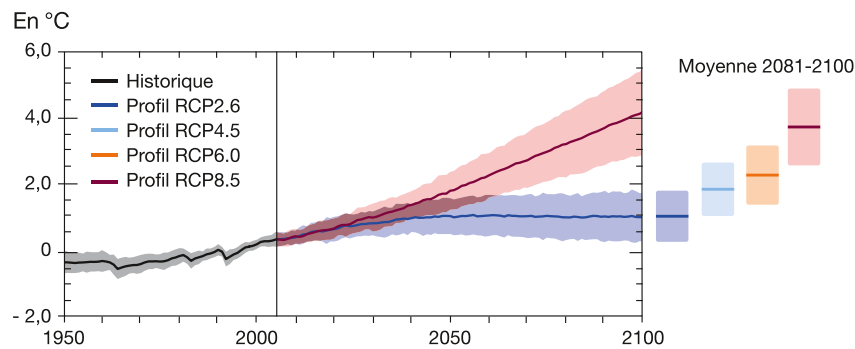


Figure 11 : Variation de la température des RCP2,6 (bleu) et 8,5 (rouge), par rapport à la période 1950-2005. Les courbes représentent l'évolution de la température selon les scénarios climatiques, et les parties ombragées, leurs écarts-types (Giec, 1er groupe de travail, 2013, référencé dans Ministère de la transition écologique de France, 2021).

Pour réaliser les simulations, les projections de radiation, température minimale journalière, température moyenne journalière, vitesse du vent et précipitations moyennes journalières du scénario climatique ont été utilisées comme environnement climatique, lors des simulations. Ces données ont pu être téléchargées via l'« European Centre for Medium-Range Weather Forecasts »<sup>5</sup>, où elles représentent un scénario climatique journalier entre l'année 2006 et l'année 2100. Les scénarios au sein d'HETEROFOR sont simulés entre 2020 et 2129. Au-delà de l'année 2100, HETEROFOR reprendra alors aléatoirement, pour chaque nouvelle année, les données d'une année connue, parmi les 20 dernières. Comme le modèle HETEROFOR ne se base que sur des données horaires, un fichier de discrétisation des données journalières présent dans le modèle permet de les transformer en données horaires. Il convient de noter que la concentration en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) restera constante dans le modèle, afin d'éviter l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Cet effet consiste en l'augmentation de la fixation de carbone par certaines plantes, lors de la phase de photosynthèse, résultant de l'augmentation en concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Or, la taille et le poids sec de la plante étant proportionnels au carbone fixé, une erreur de surestimation de la croissance pourrait être engendrée par les scénarios climatiques du GIEC, dans le programme HETEROFOR (L. Hartwell, T. Baker, et J. Boote 1997). Celle-ci peut donc être évitée par la constance de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique. La valeur du CO<sub>2</sub> dans le modèle s'élève donc à 380 ppm, correspondant à la valeur utilisée lors de la calibration du modèle HETEROFOR. Cette valeur est proche de la moyenne de CO<sub>2</sub> atmosphérique actuelle, valant 416 ppm (US Department of Commerce 2022).

Une projection climatique est réalisée à l'aide d'un modèle. Dans le cas du scénario RCP8,5, les données climatiques ayant été téléchargées proviennent du modèle CanESM2. Ce modèle est la deuxième génération du Canadian Earth System Model, développé par le

<sup>5</sup> En ligne : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse du Climat (Gouvernement du Canada 2017). Ce choix s'est porté sur la disponibilité des données journalières pour les scénarios concernés, ainsi que sur le caractère local du modèle face aux données de terrain. Il convient, cependant, de prendre en compte que ces données peuvent démontrer une certaine marge d'erreur face à la réalité.

#### 4.4.3. GESTIONS SYLVICOLES

La section 3.8. de l'état de l'art présente la coupe progressive irrégulière, appliquée habituellement sur les érablières rouges du Centre-du-Québec. Cette méthode de gestion sera représentée lors des simulations dans HETEROFOR selon une suite d'interventions expliquées ci-après.

Le peuplement ayant été spatialisé en 2020, cette année marquera le début des simulations. La Figure 12 expose les différentes méthodes de gestion appliquées au peuplement témoin.

Cinq scénarios sylvicoles différents seront comparés, dans le but d'identifier lequel d'entre eux permet une meilleure résilience du peuplement face à une tempête. La première gestion sylvicole est la Libre évolution (NM). Elle n'implique aucune gestion de la part du sylviculteur. Vient ensuite le Business as usual (BAU). Il correspond à la continuité de la gestion antérieure du peuplement, la coupe progressive irrégulière. À cet effet, deux coupes sont réalisées lors de ce scénario. La première, en 2020, correspond à l'établissement de cinq trouées, au sein de la parcelle. La deuxième, en 2060, est réalisée selon deux axes : la coupe d'érables rouges arrivés au diamètre d'exploitabilité et une coupe des autres espèces arrivées à maturité. Ces interventions seront répétées selon les mêmes critères dans les trois derniers scénarios sylvicoles. Ceux-ci ont cependant pour particularité d'impliquer un enrichissement avec deux nouvelles espèces, en 2020.

Le premier scénario d'enrichissement (CCmoy) vise à augmenter la tolérance globale à la sécheresse du peuplement, par la plantation de nouvelles espèces, sans modification de la diversité fonctionnelle. Comme le montre le Tableau 4, quatre groupes fonctionnels étaient initialement présents (1, 3, 4 et 5). Les espèces ajoutées sont donc l'*Acer saccharinum* (groupe fonctionnel 4) et le *Prunus serotina* (groupe fonctionnel 3). Ce choix d'espèces est justifié par leur tolérance moyenne à la sécheresse, représentée par l'indicateur de tolérance à la sécheresse (Drought Tol., dont le chiffre augmente proportionnellement avec la tolérance de l'espèce ; Niinemets & Valladares, 2006), dans le Tableau 4.

Lors du quatrième scénario, du *Tilia americana* (groupe fonctionnel 6) et du *quercus Rubra* (groupe fonctionnel 7) ont été plantés en vue d'augmenter la diversité

fonctionnelle, avec une tolérance à la sécheresse moyenne (CCmoy + DF). Le nombre de groupes fonctionnels passe donc de quatre à six (1, 3, 4, 5, 6 et 7), avec des espèces moyennement plus adaptées à la sécheresse.

Enfin, le cinquième et dernier scénario implique une augmentation de la diversité fonctionnelle de la même façon que pour le quatrième scénario, avec une augmentation maximale de la tolérance à la sécheresse (CCforte + DF). Pour cela, du *Carya cordiformis* (groupe fonctionnel 6) et *Quercus macrocarpa* (groupe fonctionnel 7) ont été plantés en 2020.

Les trouées réalisées en 2020 permettent l'établissement des nouvelles espèces plantées, dans la régénération du peuplement. Lors de la plantation, la régénération naturelle des cellules concernées a été enlevée. Cela permet d'offrir la chance aux nouvelles essences de se développer sans compétition, car la hauteur moyenne lors de la plantation était de 0.5 m. La densité de plantation a été choisie afin d'espacer les plants de 1.5 m, environ. Pour cela, une densité de 2400 plants/ha a été appliquée, ce qui correspond à 24 plants par cellule de 100 m<sup>2</sup>. Afin de laisser une chance aux nouvelles espèces de prendre place dans la futaie, celles-ci ont été plantées sur 34% de la surface du peuplement. Cela correspond à 22 des cellules les plus éclairées des 64 cellules constituant la grille du peuplement, visible à la Figure 13.

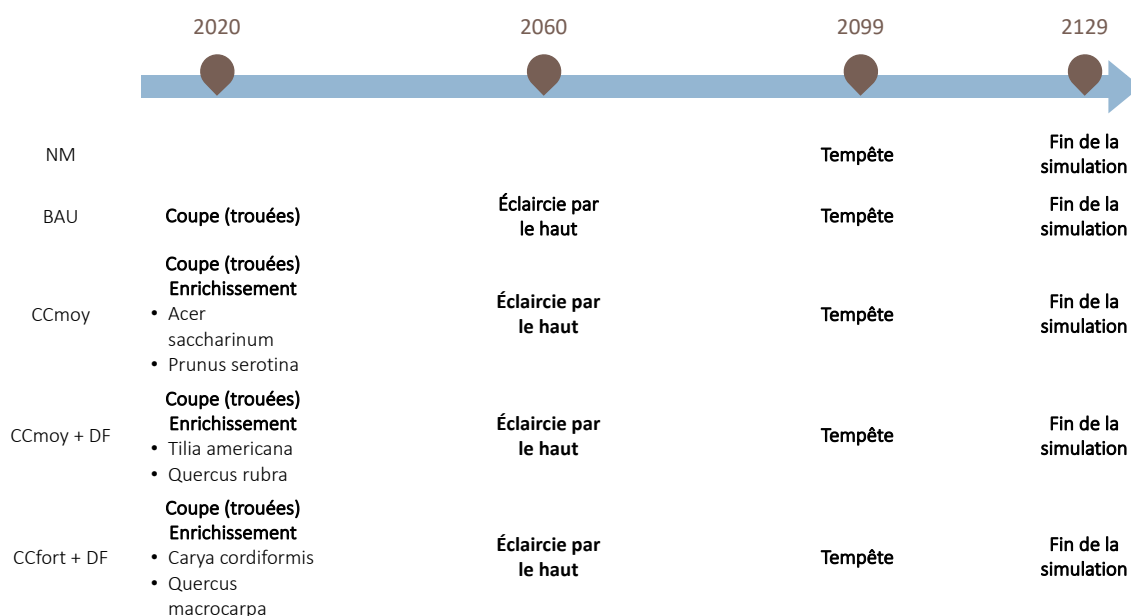


Figure 12 : Résumé des interventions réalisées lors des cinq scénarios sylvicoles des simulations : la Libre évolution (NM), le Business as usual (BAU), l'Adaptation moyenne aux changements climatiques (CCmoy), l'Adaptation moyenne aux changements climatiques et augmentation de la diversité fonctionnelle (CCmoy + DF) et l'Adaptation forte aux changements climatiques et augmentation de la diversité fonctionnelle (CCforte + DF).

Tableau 4 : Espèces déjà présentes (X noir) et introduites (X rouge) lors des scénarios. Les quatre premières espèces (*Acer rubrum*, *Pinus strobus*, *Betula papyrifera* et *Populus tremuloides*) sont déjà présentes dans le peuplement initial. Elles font donc partie intégrante des scénarios de Libre évolution (NM) et de Business as usual (BAU). Elles restent néanmoins présentes dans les autres scénarios, accompagnées d'espèces spécifiques pour leur appartenance à certains groupes fonctionnels et/ou pour leur tolérance à la sécheresse. Les trois scénarios d'enrichissement sont le CCmoy (augmentation moyenne de la tolérance à la sécheresse), le CCmoy + DF (augmentation de la diversité fonctionnelle avec un même niveau d'augmentation de tolérance à la sécheresse que CCmoy) et CCforte + DF (augmentation de la diversité fonctionnelle avec forte augmentation de la tolérance à la sécheresse).

Espèce	Groupe fonct.	Drought Tol. <sup>6</sup>	Scenarios				
			NM	BAU	CCmoy	CCmoy + DF	CCforte + DF
<i>Acer rubrum</i>	4	1.84	X	X	X	X	X
<i>Pinus strobus</i>	1	2.29	X	X	X	X	X
<i>Betula papyrifera</i>	3	2.02	X	X	X	X	X
<i>Populus tremuloides</i>	5	1.77	X	X	X	X	X
<i>Acer saccharinum</i>	4	2.88			X		
<i>Prunus serotina</i>	3	3.02			X		
<i>Tilia americana</i>	6	2.88				X	
<i>Quercus rubra</i>	7	2.88				X	
<i>Carya cordiformis</i>	6	4					X
<i>Quercus macrocarpa</i>	7	3.85					X
<b>Nombre de groupes fonctionnels</b>			4	4	4	6	6

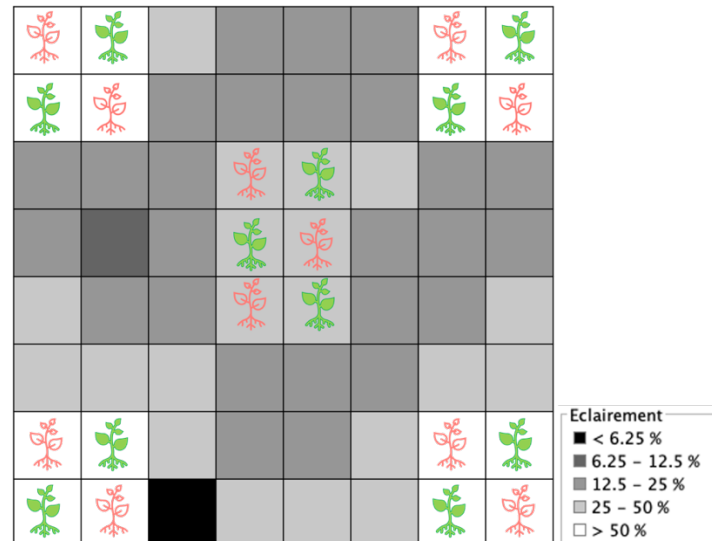


Figure 13 : Plantations effectuées pour les scénarios d'enrichissement. La couleur des cases représente le pourcentage de lumière reçue au sol. La répartition des icônes vertes pleines et roses vides correspond aux cases où ont été plantées les deux espèces différentes. Ainsi, l'*Acer saccharinum*, le *Tilia americana* et le *Carya cordiformis* sont plantés dans les cases à icône verte et pleine, respectivement pour les scénarios CCmoy, CCmoy + DF et CCforte + DF. Le *Prunus serotina*, *Quercus rubra* et *Quercus macrocarpa* sont plantés aux cases à icône rose et vide, pour les mêmes scénarios.

<sup>6</sup> (Niinemets et Valladares 2006)

#### 4.4.4. TEMPÊTE DE VENT

Pour tous les scénarios sylvicoles, une tempête est modélisée comme évènement climatique extrême. Celle-ci s'élève à une vitesse de  $49 \text{ m.s}^{-1}$  et a lieu en hiver. Selon les relevés entre 1981 et 2010 de la station météorologique de Sutton, l'Ouest est la direction majoritaire du vent, lors de la période hivernale (Gouvernement du Québec 2015). Cette condition sera donc respectée dans le modèle HETEROFOR, lors de l'initialisation de la tempête. Cette dernière peut avoir trois conséquences sur les arbres de futaie. Un individu peut être renversé, cassé ou impacté par un autre chablis. Trente ans d'évolution du peuplement sont ensuite simulés sans aucune intervention, afin d'étudier la résilience.

### 4.5. ANALYSE DES SIMULATIONS

#### 4.5.1. PRINCIPES

L'analyse des simulations est essentiellement basée sur la résilience du peuplement face à l'évènement de tempête, selon les différents contextes sylvicoles. Elle se base sur différents outils de caractérisation du peuplement avant et après la tempête, à travers divers indicateurs.

#### 4.5.2. INDICATEURS

Les perturbations globales peuvent avoir des impacts structurels, comme la réduction de la biomasse ou du couvert forestier, et fonctionnels, comme un changement dans les communautés, pour les forêts (Reyer et al. 2015). Ces différentes variables peuvent être étudiées, en tant qu'indicateurs. Pour évaluer la résilience d'un peuplement, il est intéressant de combiner plusieurs indicateurs pertinents. Trois indicateurs de résilience seront donc utilisés dans les calculs de résilience du peuplement, et trois indicateurs descriptifs permettront de compléter cette analyse.

Les indicateurs de résilience utilisés sont la surface terrière, l'indice de surface foliaire et la production primaire nette. La contribution de la régénération et des nouvelles recrues de la futaie sera évaluée séparément de celle des arbres initialement présents, pour ces trois caractéristiques.

La **surface terrière** (G) représente un des indicateurs les plus importants et les plus utilisés dans l'évaluation de la résilience forestière (Nikinmaa 2022). Elle est choisie comme indicateur car c'est une variable sensible aux tempêtes, liée à la dynamique d'accumulation du carbone et donc à la séquestration de celui-ci et la réduction de l'impact des changements climatiques (Bhaskar et al. 2017). Elle peut être calculée à l'échelle du peuplement, en sommant la surface de la section transversale à 1m30 de tous les arbres qui le composent (Rondeux 1995). La surface terrière est un indicateur permettant d'évaluer facilement la résilience de la forêt en termes de densité du

peuplement (Lloret, Keeling, et Sala 2011; Rondeux 1995). Elle est directement calculée au sein de HETEROFOR, en  $\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$ .

L'**indice de surface foliaire** (LAI, pour Leaf Area Index,  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) est un indicateur de santé de l'écosystème (Yi et Jackson 2021). Il représente la quantité de surface foliaire (relative aux feuilles des arbres) par unité de surface de sol (Fang et al. 2019). Cet indicateur est intéressant car il est directement relié à des processus-clés des cycles forestiers, à savoir la photosynthèse, la respiration et l'interception des précipitations (Fang et al. 2019). La World Meteorological Organization (WMO) et al. (2011) définissent également le LAI comme une variable fondamentale dans la recherche sur les changements climatiques. Elle est directement calculée au sein d'HETEROFOR.

La **production primaire nette** (PPN), en  $\text{g}$  de carbone. $\text{m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , est une des meilleures possibilités pour caractériser la croissance, le fonctionnement et la séquestration du carbone d'une forêt (Jha, Das, et Goyal 2019; Yi et Jackson 2021). Elle peut être définie comme la quantité d'énergie fixée dans la biomasse produite par une plante (Jha, Das, et Goyal 2019; Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse 2019). Cet indicateur témoigne d'une complétude pour l'étude de la résilience forestière car il est en lien direct avec les conditions climatiques et le type de végétation (Jha, Das, et Goyal 2019). Une perte de résilience dans certaines forêts a déjà été statistiquement liée à une baisse de leur production primaire (Forzieri et al. 2022). Il a également déjà été prouvé que la PPN est altérée avec les perturbations environnementales (Jha, Das, et Goyal 2019). Sa sensibilité face au climat rend cet indicateur utile dans l'étude de la résilience de la forêt face à la tempête, mais rend également compte du futur comportement potentiel des forêts face aux changements climatiques en vigueur (Jha, Das, et Goyal 2019). La PPN est directement calculée au sein de HETEROFOR.

Les indicateurs descriptifs seront utilisés de façon graphique et à l'aide de moyennes avant et après perturbation, et sont : L'évapotranspiration, le stock de carbone et l'indice de Simpson.

L'**évapotranspiration** (ET), en  $\text{mm}.\text{an}^{-1}$ , est un processus dérivé de l'évaporation directe de l'eau du sol et de la transpiration des arbres (Musy et Higy 2004). Cet indicateur est intéressant pour deux raisons. La première est qu'il est en relation étroite avec la température atmosphérique. En effet, bien que la réponse de l'évapotranspiration face aux sécheresses est hautement incertaine, il existe un paradoxe sur cet indicateur avec la hausse des températures. Celui-ci indique qu'une sécheresse tend à diminuer l'ET en raison de l'épuisement des ressources hydriques du sol, alors qu'elle induit également une hausse de l'ET, en raison de la demande plus élevée en humidité atmosphérique (Jha, Das, et Goyal 2019; Zhao et al. 2022). Un phénomène de hausse globale a cependant été

observé et prouvé (Zhao et al. 2022). Les changements climatiques sont donc source d'anomalies concernant l'évapotranspiration, créant un stress au sein des plantes (Jha, Das, et Goyal 2019; Nikinmaa 2022; Zhao et al. 2022). L'autre raison rendant l'ET intéressante est qu'elle reflète à la fois le LAI et le fonctionnement des flux hydriques des plantes. Elle est donc considérée comme un indicateur utile pour l'évaluation de la résilience des peuplements au niveau hydrique. L'ET est directement calculée au sein d'HETEROFOR.

Un des rôles essentiels de la forêt est son potentiel de séquestration du carbone. Ce processus peut, en outre, être utilisé comme stratégie d'atténuation des changements climatiques (Buotte et al. 2020). Cependant, une perturbation telle qu'une tempête induit des pertes en nombre d'arbres, par le phénomène de chablis. Or, les arbres stockent perpétuellement le carbone, considérant leur absorption proportionnelle à leur croissance. Une perte de puits à long terme résulte donc de ce type d'évènement extrême. Le **stock de carbone** constitue ainsi un indicateur permettant d'évaluer la résilience forestière. Il est directement calculé par HETEROFOR, sur base de la biomasse. Par convention, la quantité de carbone considérée dans la biomasse est de 0.5 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2003; Ouedraogo et al. 2019). Le stock de carbone dans la biomasse des branches, feuilles, tiges, racines et fines racines de tous les arbres a été sommé.

Buotte et al. (2020) rappellent que certaines forêts peuvent témoigner d'une faible séquestration du carbone, mais d'une biodiversité élevée. Cela rend à nouveau compte de l'importance de la combinaison d'indicateurs dans l'évaluation de la résilience forestière. Pour évaluer l'influence de la tempête et des changements climatiques sur la biodiversité et la régularité des espèces, l'**Indice de Simpson (IS)** fait partie des indicateurs utilisés pour l'analyse des simulations (Pan, McCullough, et Hollinger 2018). L'indice de Simpson est directement calculé dans HETEROFOR, comme étant la somme des rapports de la surface terrière d'une espèce ( $g$ ) et de la surface terrière totale du peuplement, toutes espèces confondues ( $G$ ), au carré (Pan, McCullough, et Hollinger 2018) :

$$IS [-] = \sum \left(\frac{g}{G}\right)^2 \quad (6)$$

#### 4.5.3. ÉVALUATION DE LA RESILIENCE

Pour évaluer la résilience, un scénario sera réparti en trois grandes catégories : l'état initial ou stable est considéré comme l'état du système juste avant la perturbation, la tempête est le changement appliqué au système, et son taux de récupération constitue le temps suivant la perturbation, jusqu'à la fin de la simulation.

La résilience sera évaluée selon le schéma de la Figure 14 et les équations de Lloret et al. (2011), Bhaskar et al. (2017) et Yi & Jackson (2021), classiques ou revisitées, pour les trois indicateurs de résilience.

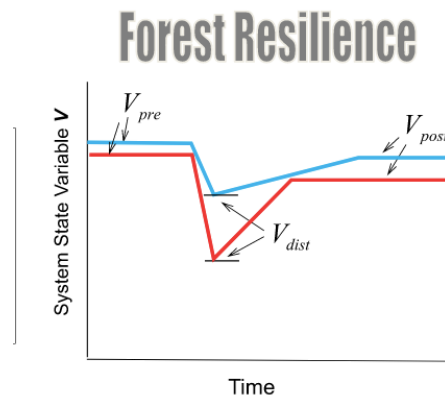


Figure 14 : Illustration des composants principaux de la résilience. Le graphe présente l'évolution d'une variable du système (p.e. la surface terrière), en fonction du temps. Le  $V_{pre}$  constitue la variable étudiée avant la perturbation. Le moment où les courbes rouges et bleues tombent à la verticale pour atteindre le  $V_{dist}$  correspond au moment où la perturbation a lieu (p.e. une tempête). Le  $V_{post}$ , finalement, représente la variable étudiée à la suite de la perturbation (Yi et Jackson 2021).

Pour les différents calculs de résilience,  $V_{dist}$  est l'indicateur étudié directement après la tempête (2099),  $V_{pre}$  la valeur de l'indicateur avant la tempête (2099), et  $V_{post}$  celui-ci trente ans après la tempête (2129). Afin de prendre une même référence pour tous les scénarios, un même  $V_{pre}$  a été utilisé pour les calculs, pour chaque indicateur. Celui-ci correspond à la moyenne des valeurs de l'indicateur pour toutes les années précédant la tempête, au sein de tous les scénarios. Ce choix est justifié par la volonté d'utiliser  $V_{pre}$  comme repère standard du peuplement, afin de s'affranchir de son parcours sylvicole.

La **résistance** du peuplement face à la tempête est d'abord évaluée par le ratio de l'indicateur (ou variable  $V$ ) directement après la tempête et avant celle-ci :

$$Rt [-] = \frac{V_{dist}}{V_{pre}} \quad (7)$$

Avec  $\Delta t$ , les 30 ans de simulation post-perturbation, le **taux de récupération** est défini selon la relation :

$$TR \left[ \frac{\text{unité}}{\text{temps}} \right] = \frac{V_{post} - V_{dist}}{\Delta t} \quad (8)$$

Le **taux de récupération relatif** :

$$TR [\%] = \frac{TR_{Scénario}}{TR_{Scénario NM}} * 100 \quad (9)$$

Où  $TR_{\text{Scénario}}$  correspond au taux de récupération du scénario étudié, et  $TR_{\text{Scénario NM}}$ , le taux de récupération du scénario de Libre évolution.

Le **temps de récupération** :

$$Tr [\text{années}] = \frac{V_{pre} - V_{dist}}{TR} \quad (10)$$

La **résilience** est calculée selon :

$$Re = \text{Résilience } (-) = \frac{Tr * (V_{pre} - V_{dist})}{2} \quad (11)$$

Enfin, la **résilience relative** :

$$\begin{aligned} Rr = \text{Résilience relative } [\%] &= 100 + \left( \frac{\text{Aire de référence} - \text{Aire de la modalité}}{\text{Aire de référence}} * 100 \right) \\ &= 100 + \left( \frac{\text{Résilience}_{\text{Scénario NM}} - \text{Résilience}_{\text{Scénario}}}{\text{Résilience}_{\text{Scénario NM}}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Où l'aire de référence correspond à la résilience du scénario de Libre évolution, et l'aire de la modalité, à la résilience du scénario étudié.

## 5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats sont subdivisés en deux grandes parties. La première est l'aboutissement de la recherche de paramètres pour les équations de croissance des semis. Elle indique quelle paramétrisation est jugée la plus optimale à utiliser dans le modèle HETEROFOR. La deuxième partie des résultats concerne les simulations générées au sein du programme, suite à la calibration du module de régénération. La situation initiale sera rappelée, avant de décrire les résultats des cinq scénarios sylvicoles, ainsi que la contribution des essences introduites lors des trois scénarios d'enrichissement. Finalement, la résilience de ces scénarios sera évaluée, dans le but de définir si l'un d'eux représente une solution de protection et d'anticipation de l'érablière rouge du Centre-du-Québec, face à un évènement de tempête, dans le contexte des changements climatiques.

### 5.1. PARAMETRISATION DU MODULE DE REGENERATION

#### 5.1.1. CROISSANCE EN HAUTEUR EN FONCTION DE LA LUMIERE

L'un des enjeux de la modélisation est qu'il est nécessaire de rendre le modèle le plus proche de la réalité. La croissance des arbres au stade de régénération et au stade adulte est basée sur une variété d'équations, dont les paramètres sont différents selon le stade de l'arbre. La calibration de ces paramètres est réalisée à l'aide de données de terrain. Cela signifie qu'il est toujours possible de tenter de les améliorer, en complétant l'inventaire sur lequel ils se basent. Concernant la croissance des différentes espèces, au stade de régénération, la relation de croissance en fonction de la lumière est la plus importante au sein du module. En effet, la lumière est l'élément ayant le plus d'impact sur la croissance des semis, dans le modèle. Il est donc justifié de tenter de calibrer cette équation au mieux pour chaque espèce, au sein d'HETEROFOR. La calibration est donc une étape selon laquelle les données de terrain ont été combinées, dans le but de paramétrer une équation allométrique, pour lui permettre d'être représentative des tendances naturelles, à l'aide du logiciel R. À cet effet, l'équation de croissance en fonction de la lumière (sans prendre en compte la tolérance à l'ombrage) a été calibrée pour les différentes espèces-cibles, au stade de régénération, sur base des données récoltées pour ce mémoire. Le Tableau 5 reprend les paramètres obtenus pour chaque essence, ainsi que les indicateurs statistiques permettant d'évaluer la qualité de la paramétrisation. Ces paramètres ont donc été utilisés, au sein d'HETEROFOR, lors des simulations. La Figure 15 complète ce tableau, à l'aide des régressions linéaires y étant associées.

Tableau 5 : Paramètres obtenus pour l'équation de croissance en fonction de la lumière des cinq espèces-cibles, au stade de régénération. Les indicateurs utilisés sont : l'intercept, coordonnée où la régression linéaire basée sur les paramètres touche l'axe des abscisses (idéalement 0) ; la pente de la régression linéaire (idéalement 1) ; le Model Efficiency, évaluateur des compétences prédictives du modèle (idéalement 1) ; la p-valeur d'un test de Student (idéalement 0) et le r de Pearson évaluant la répartition des données (idéalement 1).

Équations spécifiques aux espèces, sans tolérance à l'ombrage							
Espèce (français)	Espèce (latin)	Paramètres	Intercept [I.C.]	Pente [I.C.]	M.E.	p-valeur	r de Pearson
Épinette	<i>Picea glauca</i>	a = 1.22 b = 1.99 c = 15.61	-6.241 [-13.67; 1.188]	1.359 [0.988 ; 1.730]	0.439	0.887	0.666
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i>	a = 0.55 b = 2.72 c = 16.45	-10.092 [-17.178 ; -3.006]	1.395 [1.121 ; 1.669]	0.507	0.376	0.715
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i>	a = 2.23 b = 2.90 c = 10.21	-8.062 [-15.372 ; 0.752]	1.334 [1.067; 1.601]	0.589	0.996	0.768
Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>	a = 1.35 b = 2.77 c = 9	-8.056 [-15.447; -0.665]	1.407 [1.07; 1.744]	0.505	1	0.711
Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i>	a = -0.16 b = 3.86 c = 1.63	-27.519 [-51.292 ; -3.746]	1.659 [1.073; 2.245]	0.401	0.358	0.643

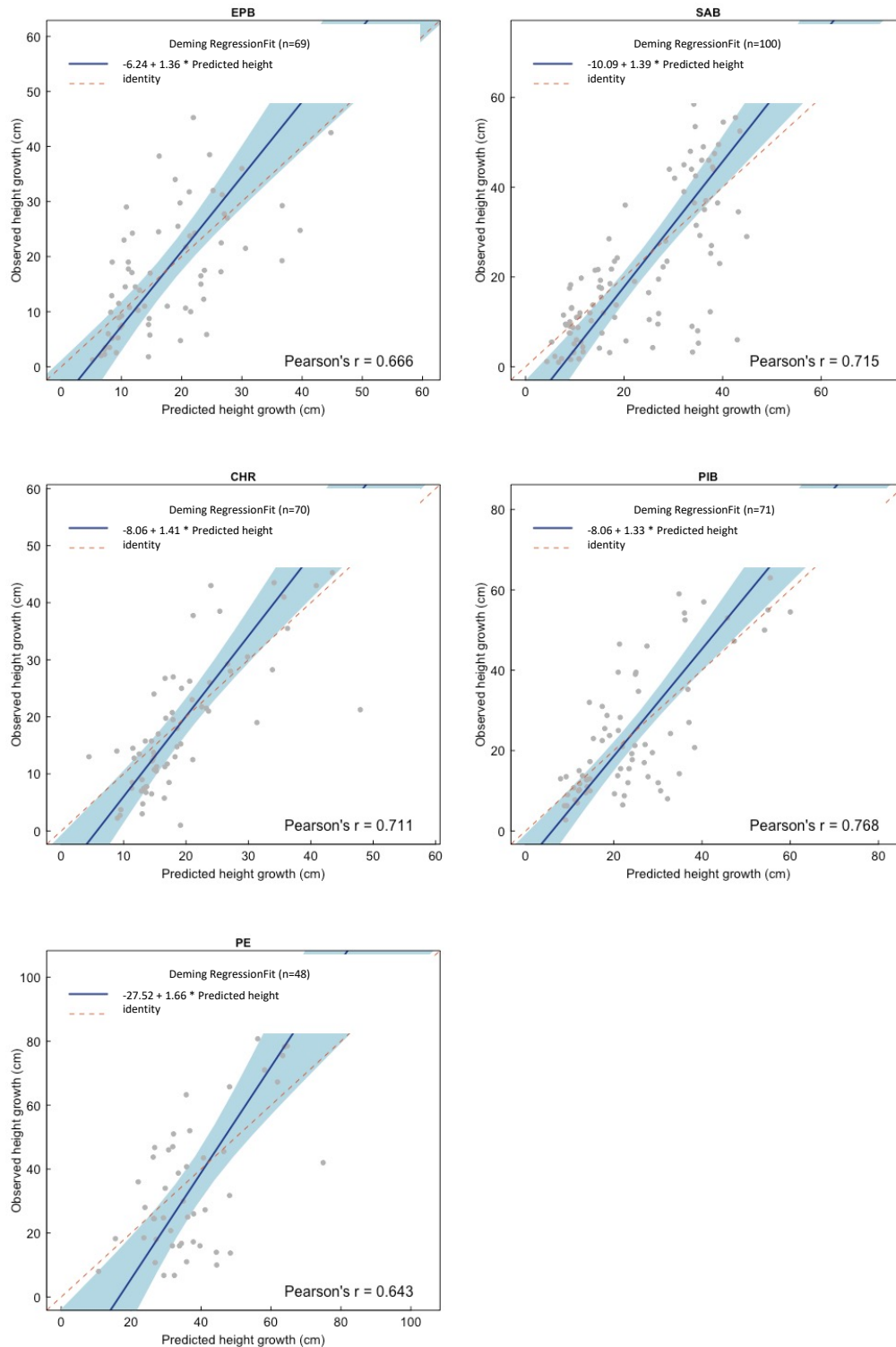


Figure 15 : Régressions linéaires associées aux paramètres spécifiques à chaque espèce : EPB (Épinette blanche), SAB (Sapin baumier), CHR (Chêne rouge d'Amérique), PIB (Pin blanc) et PE (Peuplier faux-tremble). La régression linéaire permet d'évaluer les performances du modèle de croissance en hauteur, sur base d'une comparaison entre prédictions (axe horizontal) et observations (axe vertical). La droite rouge, en pointillés, correspond à la droite d'identité, où  $y = x$ . La droite bleu foncé est la régression entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites à partir des paramètres nouvellement ajustés. La zone bleu clair est l'intervalle de confiance de la régression linéaire. Idéalement, la droite bleue doit être au plus proche de la droite d'identité, et rester au sein de la zone bleutée.

Dans le cas où une essence doit être utilisée lors de simulations au sein du modèle, mais que celle-ci n'a pas pu être mesurée sur le terrain, une équation générique est utilisée. Cette équation combine les données de toutes les essences, afin d'être au plus proche de la croissance d'un arbre, peu importe son espèce. Elle se base sur la même équation de croissance en fonction de la lumière que pour les espèces-cibles, mais peut être rendue plus spécifique en incluant la tolérance à l'ombrage de chaque essence utilisée pour la composer. L'équation a donc été paramétrée avec et sans tolérance à l'ombrage, afin de comparer les deux. Pour la rendre plus précise, les données de croissance de M. Beudet ont été combinées à celles de ce mémoire (Beudet 2004). Les deux équations ont également été testées avec et sans les données de peuplier, qui présente une croissance significativement rapide durant ses 20 à 25 premières années, due à une reproduction par drageonnement, qui a pu être observée sur le terrain, mais également à la large gamme trophique et hydrique sur laquelle le peuplier peut s'installer (Ministère des Ressources Naturelles et al. 2013b). L'Annexe 5 présente les paramètres obtenus pour les deux équations génériques, avec et sans peuplier. Les équations sans le peuplier semblent les plus appropriées. Concernant la comparaison entre l'équation (sans les données de peuplier) avec et sans tolérance à l'ombrage, il n'y a pas énormément de différence. Pour rendre l'équation plus spécifique, les paramètres de celle incluant la tolérance à l'ombrage, sans données de peuplier ont été choisis comme équation générique, au sein d'HETEROFOR. Pour appuyer ce choix, ces paramètres ont été testés dans le modèle, pour des espèces non observées sur le terrain et font preuve d'une croissance réaliste.

Une fois l'équation générique paramétrée, elle a été appliquée aux espèces-cibles (excepté pour le peuplier, car ses données n'ont pas été utilisées pour l'établissement de cette équation), afin de déterminer si celle-ci correspondait mieux que les équations spécifiquement trouvées pour chacune d'elles. Les indicateurs statistiques présentaient de moins bons résultats, ce qui a écarté cette équation pour ces espèces, comme le démontre l'Annexe 6.

#### 5.1.2. RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR ET LE DIAMETRE AU COLLET

Au-delà de la relation de croissance en fonction de la lumière, d'autres équations servent à l'établissement de la croissance des arbres, au stade de régénération. Parmi celles-ci, les équations lient le diamètre au collet et la hauteur du plant. Afin de tenter de rendre la dynamique de croissance plus réaliste encore, pour les espèces-cibles, ces deux équations ont également été paramétrées spécifiquement. L'Annexe 7 présente les résultats obtenus lors de cette paramétrisation, sous forme de tableaux de paramètres et de graphiques. La méthodologie était de comparer les paramètres précédemment utilisés dans HETEROFOR (ajustés à partir des données de l'inventaire forestier du Québec, qui

ne comporte que très peu de petits arbres), avec ceux obtenus grâce aux nouvelles mesures de terrain (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs 2023). Cette comparaison n'a été effectuée que pour le peuplier faux-tremble, le pin blanc, le sapin baumier et le chêne rouge d'Amérique.

Il apparaît que les nouveaux paramètres obtenus n'ont une meilleure capacité prédictive de croissance que pour le sapin baumier. En effet, les courbes de l'inventaire forestier décrivent plus justement la trajectoire de croissance pour les deux équations, pour toutes les autres essences. Il a donc été décidé de garder les anciens paramètres pour toutes les espèces-cibles, sauf pour le sapin baumier où les nouveaux paramètres ont été utilisés. Cela peut être dû au plus grand nombre de données de hauteur et de diamètre au collet prises sur le terrain pour cette espèce, permettant une plus grande précision.

## 5.2. SITUATION INITIALE (2020)

Le graphe de la Figure 16 permet de visualiser la distribution des tiges du peuplement en termes de surface terrière et d'essences. Le peuplement est une érablière rouge (l'érable rouge est l'espèce majoritaire) mature, présentant une seule cohorte. Elle est donc considérée comme régulière. Le nombre de tiges à l'hectare, selon les classes de circonférence et de hauteur est visible à la Figure 17. La distribution en cloche d'une courbe de Gauss visible sur les Figure 16 et Figure 17, concernant la circonférence et la hauteur prouvent le caractère régulier de la futaie (Massenet 2008). Les graphes démontrent également une présence dominante de petit bois<sup>7</sup>.

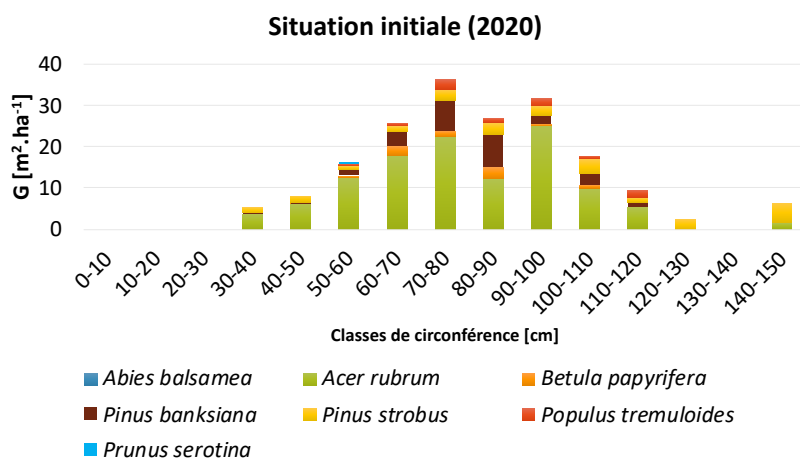


Figure 16 : Distribution de la surface terrière, selon les classes de circonférence et les essences, de la situation initiale (2020) du peuplement.

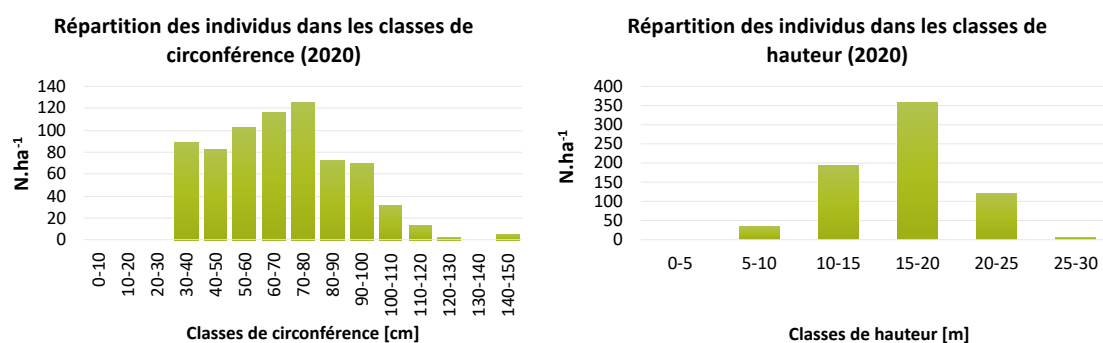


Figure 17 : Gauche : Nombre d'individus à l'hectare de la futaie dans chaque classe de circonférence, en 2020. Droite : Nombre d'individus à l'hectare dans chaque classe de hauteur, en 2020.

<sup>7</sup> Le diamètre des bois définit leur appellation. Les petits bois ont un diamètre allant jusqu'à 25 cm, le bois moyen de 25 à 45 cm, et le gros bois au-delà de 45 cm (Conseil régional de Franche-Comté, 2000).

### 5.3. ANALYSE DE SCENARIOS

#### SCÉNARIO DE LIBRE EVOLUTION (NM)

Tableau 6 : Table du peuplement lors du scénario NM. Les indicateurs utilisés sont respectivement : Hdom, la hauteur dominante du peuplement ; N, le nombre d'arbres par hectare ; G, la surface terrière ; C<sub>avant</sub>, la circonférence moyenne à 1m30 de hauteur des arbres dominants ; V, le volume bois fort des arbres de futaie ; C<sub>éclaircie</sub>, la circonférence moyenne à 1m30 de hauteur des arbres prélevés lors de la coupe ou la tempête ; Intensité en G, le rapport entre la surface terrière éclaircie et la surface terrière initiale de la même année ; P/A, le rapport entre la surface terrière prélevée et l'accroissement moyen périodique en surface terrière sur les 40 (2020 à 2060) ou 39 (2060-2099) dernières années ; la nature de l'éclaircie (mixte, par le haut, par le bas ou tempête) ; AMPG, l'accroissement moyen périodique en surface terrière ; AMPV, l'accroissement moyen périodique en volume.

NM		Avant éclaircie/tempête				Éclaircie/tempête				Intensité et nature de la coupe/tempête			Accroissement	
Année	Hdom [m]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>avant</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>éclaircie</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	Intensité en G [%]	P/A [%]	Nature de l'éclaircie	AMPG [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]	AMPV [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]
2020	22.06	717	29.4	106	307.2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
2040	24.46	512	37.5	135.6	460.6	/	/	/	/	/	/	/	0.54	9.6
2060	26	390	45	162	591.5	/	/	/	/	/	/	/	0.51	8.95
2080	27.4	342	51.7	180.7	689	/	/	/	/	/	/	/	0.4	6.16
2099	27.49	315	53.8	189	704.3	204	38.7	154	522.4	71.9	313	Tempête	0.23	3.82
2119	24.85	218	18.5	150.3	223.3	/	/	/	/	/	/	/	0.18	2.34
2129	25.06	731	23.5	155.5	264.7	/	/	/	/	/	/	/	0.57	5.99

Le scénario de Libre évolution sert de référence parmi les différentes méthodes de gestion sylvicole testées. Il sert de comparaison avec la littérature, mais également pour l'analyse de la résilience, suite à l'évènement de tempête. Habituellement, les arbres matures d'érable rouge atteignent des hauteurs de 18 à 27 m et une circonférence de 145 à 239 cm, et peuvent aller jusqu'à une hauteur de 36.6 m, en conditions idéales (Abrams 1998; S. Walters et W. Yawney 1990). Les hauteurs et diamètres du peuplement (Tableau 6) correspondent aux références concernant l'espèce, démontrant que HETEROFOR prédit de manière réaliste la croissance de l'érable rouge. Cette croissance est également évaluée sur base des accroissements moyens périodiques en surface terrière (AMPG) et en volume (AMPV). L'accroissement moyen en surface terrière du peuplement avant la tempête est de 0.48 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, et en volume de 8.2 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Une fois de plus, le modèle prédit de façon juste la croissance de l'érablière rouge, car un accroissement en surface terrière de 0.25 à 1 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> est attendu pour les feuillus du Québec et un accroissement en volume de 0.6 à 8.2 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour les érablières rouges du Centre-du-Québec (selon les associations phytosociologiques, et l'âge du peuplement ; Bégin et al., 1990; Guignabert et al., 2022).

Le Tableau 6 met également en évidence une nette réduction des accroissements, suite à la tempête. L'impact de celle-ci sur le peuplement est donc évident, et peut être

également défini par l'intensité prélevée en surface terrière, qui s'élève à 71.9%, et par le rapport du prélèvement sur l'accroissement, qui est de 313 %. Cela signifie que 71.9% de la surface terrière a été perdue suite à la tempête, et que les prélèvements correspondent à 313% de l'accroissement. Ces chiffres seront donc retenus comme référence, dans le but d'évaluer si les scénarios impliquant une gestion permettent une réduction de l'impact de la tempête, sur le peuplement.

Il est possible, à l'aide de la Figure 18, de visualiser l'évolution du peuplement avant et après la tempête. L'évolution de la surface terrière et des classes de circonférence entre 2020 (voir Figure 16) et 2060 montre que la croissance en circonférence des tiges sur cette période a évolué de 40 cm à 100 cm de circonférence. En comparaison avec les graphes de 2060 et 2099 (avant tempête) de la Figure 18, où la croissance était en moyenne de 30 cm de circonférence, la croissance en grosseur est plus élevée. Ce phénomène, également visible aux accroissements du Tableau 6, démontre la variabilité de croissance en grosseur avec l'âge du peuplement. Il est attendu, en effet, qu'un peuplement plus jeune ait une croissance plus rapide. En observant les plus petites classes de circonférence des graphes jusqu'en 2099 (avant tempête), il est possible de remarquer que la surface terrière occupant ces classes est très faible, voire inexistante. Cela témoigne d'un faible passage à la futaie de nouvelles recrues, et peut être traduit par un couvert dense empêchant l'accès à la lumière pour la régénération. En effet, en l'absence d'éclaircies, un nombre important d'arbres reste sur pied, induisant une concurrence élevée, notamment au niveau des houppiers. De plus, en 2020, 2060 et 2099 (avant tempête), les graphes forment une cloche en courbe de Gauss. Cela signifie que le peuplement est resté régulier avec le manque de gestion. Finalement, la majorité des arbres de grosses circonférences sont des pins blancs et gris.

Les graphes de la Figure 18, accompagnés de la Figure 19 et du Tableau 6, permettent également de visualiser les quantités de bois impactés par la tempête. Le chablis est le dégât principal causé par la perturbation. Lorsque les graphiques avant et après tempête de la Figure 18 sont comparés, il advient que l'érable rouge a été tout autant impacté que les autres essences, et que les chablis se sont produits dans toutes classes de circonférence (Figure 19). En 2129, se termine la période de récupération étudiée, après perturbation, lors de laquelle un nombre significatif de nouvelles tiges est passé à la futaie. Cela peut être observé par la surface terrière des faibles classes de circonférence (10 à 80 cm de circonférence) en 2129 (Figure 18). Il en résulte que la tempête a eu le même effet qu'une éclaircie, permettant à la régénération de se développer et d'atteindre enfin des dimensions de futaie. Cela peut être appuyé par le graphe de la Figure 20, démontrant une période de dix-huit ans ayant été nécessaire à la régénération pour atteindre les 10 mètres du stade de la futaie. La régénération s'est, en

effet, installée dès la première année suivant la perturbation. En 2119, les tiges passées à la futaie sont des peupliers, dont la croissance est plus rapide que les autres. Le deuxième pic de croissance, en 2124 concerne les pins, suivis par les érables rouges.

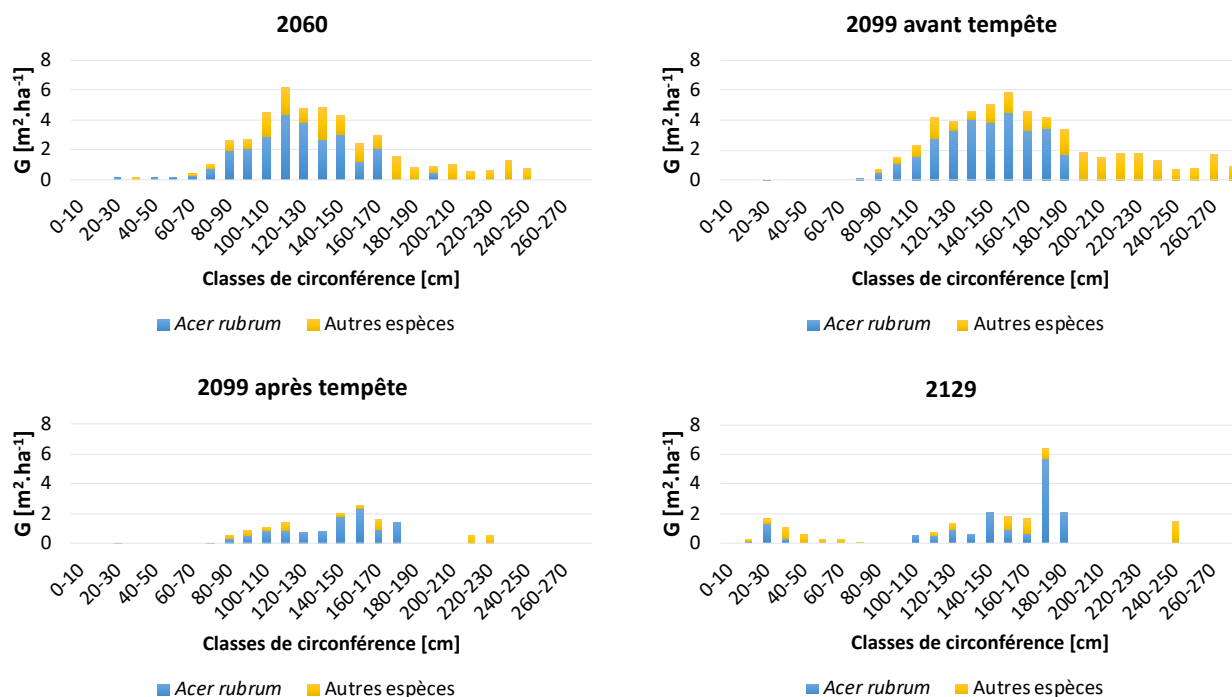


Figure 18 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario de Libre évolution, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).

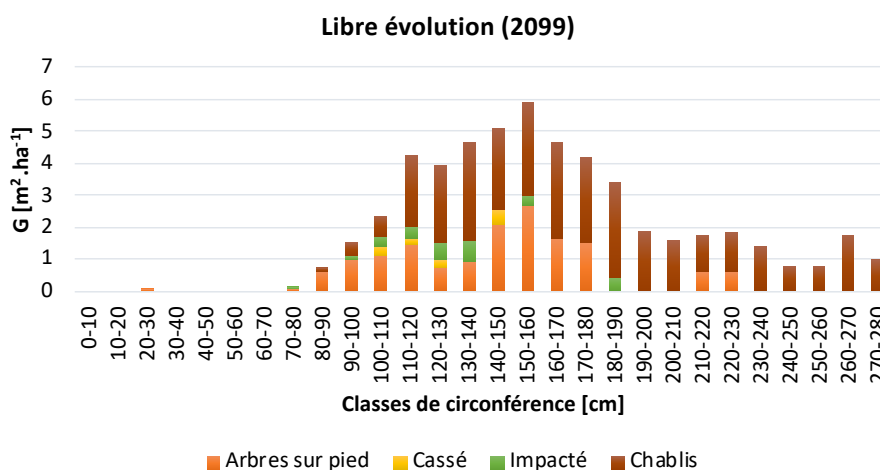


Figure 19 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099, lors du scénario de Libre évolution. Ce graphique présente les dégâts causés par la tempête de cette même année (arbres cassés, arbres impactés et chablis), ainsi que les arbres sur pied après la perturbation.

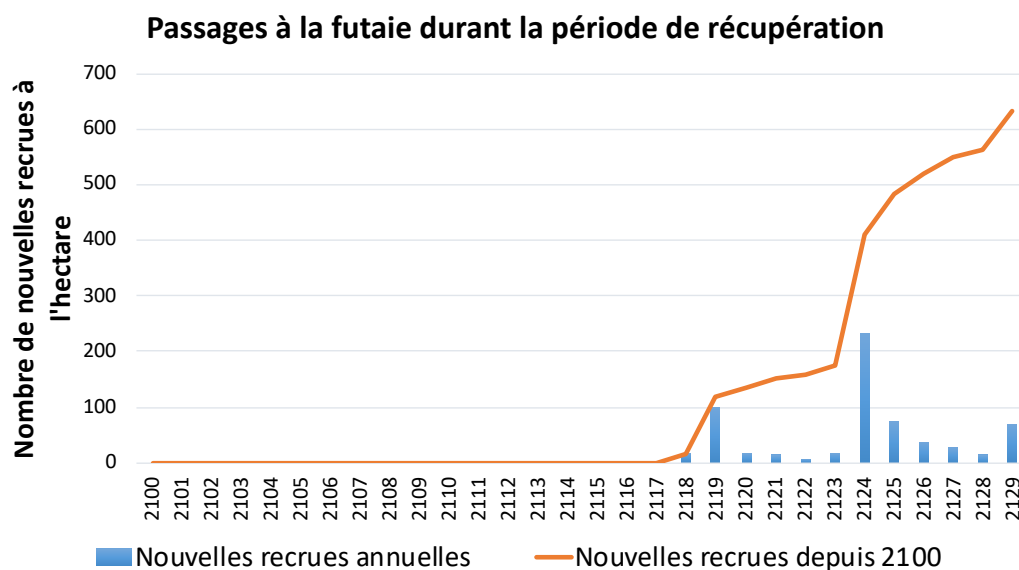


Figure 20 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2009, lors du scénario de Libre évolution.

## SCÉNARIO DE BUSINESS AS USUAL (BAU)

Tableau 7 : Table du peuplement lors du scénario BAU. Les indicateurs utilisés sont les mêmes que ceux du Tableau 6.

BAU		Avant éclaircie/tempête				Éclaircie/tempête				Intensité et nature de la coupe/tempête			Accroissement	
Année	Hdom [m]	N [Nb/ha]	G [ $m^2 \cdot ha^{-1}$ ]	C <sub>avant</sub> [cm]	V [ $m^3$ ]	N [Nb/ha]	G [ $m^2 \cdot ha^{-1}$ ]	C <sub>éclaircie</sub> [cm]	V [ $m^3$ ]	Intensité en G [%]	P/A [%]	Nature de l'éclaircie	AMPG [ $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ]	AMPV [ $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ]
2020	22.06	717	29.4	106	307.2	283	11.6	71.5	115.7	39.4	/	Trouées	/	/
2040	23.58	410	26.1	128.3	319	/	/	/	/	/	/	/	0.47	7.1
2060	24.63	767	38.4	154.5	472	82	16	124.6	212.6	41.7	69	Par le haut	0.69	8.86
2080	25.33	559	34.6	148	442.2	/	/	/	/	/	/	/	0.65	9.6
<b>2099</b>	25.65	403	37.6	163.9	489.7	165	22.7	131.3	314.3	60.4	129	Tempête	0.24	3.8
2119	24.04	295	21.3	137.9	262.4	/	/	/	/	/	/	/	0.34	4.83
2129	25.69	640	24.6	147	319.9	/	/	/	/	/	/	/	0.60	6.71

Le Business as usual est le premier scénario de gestion impliquant des coupes. Pour rappel, les coupes sont nécessaires pour assurer le renouvellement de la forêt et pour permettre aux arbres-objectifs de se développer sans trop de compétition. On peut remarquer les effets positifs des coupes dans le Tableau 7. Par exemple, l'augmentation du nombre de tiges entre 2040 et 2060 sous-entend qu'un nombre important de nouveaux individus a pu s'installer et passer à la futaie, ce qui s'explique par l'augmentation de la ressource en lumière apportée par les trouées de 2020. Les accroissements avant la tempête sont également de plus en plus élevés, témoignant du développement progressif des arbres adultes. La Figure 21 démontre ces observations. Lors des années 2060 et 2099, une partie de la surface terrière est occupée par des tiges

de petites circonférences. Cela signifie que le peuplement a pu, au cours de son évolution, se régénérer de façon à ce que les nouvelles tiges grandissent et passent au stade de futaie.

Une autre différence peut être observée entre la Figure 18 du scénario de Libre évolution et la Figure 21 du scénario de Business as usual. Sans gestion, la densité du couvert ne permet pas l'installation d'une cohorte de régénération. Or, à l'aide de coupes (scénario BAU), une deuxième cohorte a pu se former dans la futaie. Les deux cohortes sont représentées par deux bosses dans la distribution des surfaces terrières de 2060 et 2099 (Figure 21). À l'inverse, le peuplement en Libre évolution n'est représenté que par une seule cloche (Figure 18). Cela témoigne de la réussite de l'un des objectifs de la gestion sylvicole : l'irrégularisation du peuplement. En effet, la gestion appliquée lors du BAU et des scénarios suivants est sous forme de « Coupe progressive irrégulière à couvert continu », dont le but est de rendre le peuplement irrégulier à deux cohortes.

L'impact de la tempête est moins important, en comparaison avec les données de référence du scénario de Libre évolution (NM). Pour rappel, le peuplement en NM subissait un dégât d'une intensité de 71.9% en surface terrière et un rapport de prélèvement sur accroissement de 313%. Lors du scénario BAU, une intensité de 60.4% et un P/A de 129% ont été causés par la tempête. Cela signifie que la surface terrière ayant subi des dégâts est moins élevée lors de ce scénario, et qu'environ 2.4 fois moins d'accroissement a été prélevé, pour une même période. Les dégâts de tempête peuvent également être visibles au graphe de 2099 (après tempête) de la Figure 21, et à la Figure 22. De même que lors du scénario de NM, le chablis est le dégât le plus important causé par la tempête. Les arbres de petite circonférence ne tombent pas, mais seront plutôt impactés par les chablis des gros arbres.

La surface terrière occupée par les petites classes de circonférence en 2129 (Figure 21 ; Figure 23) montre que de nouvelles recrues sont passées vers la futaie lors de la période de récupération entre 2099 et 2129. La même tendance que lors du NM peut être remarquée, avec deux pics en 2118 et à partir de 2124. Cela se traduit par le fait que les espèces présentes dans la régénération sont les mêmes pour les deux scénarios. Une différence de quantité de régénération, cependant, peut être observée. Celle-ci peut être liée à l'intensité moins élevée de la tempête, lors du BAU, induisant donc moins de lumière disponible au sol. Concernant les accroissements du Tableau 7 entre 2099 et 2129, ils témoignent d'une meilleure croissance que lors du scénario NM.

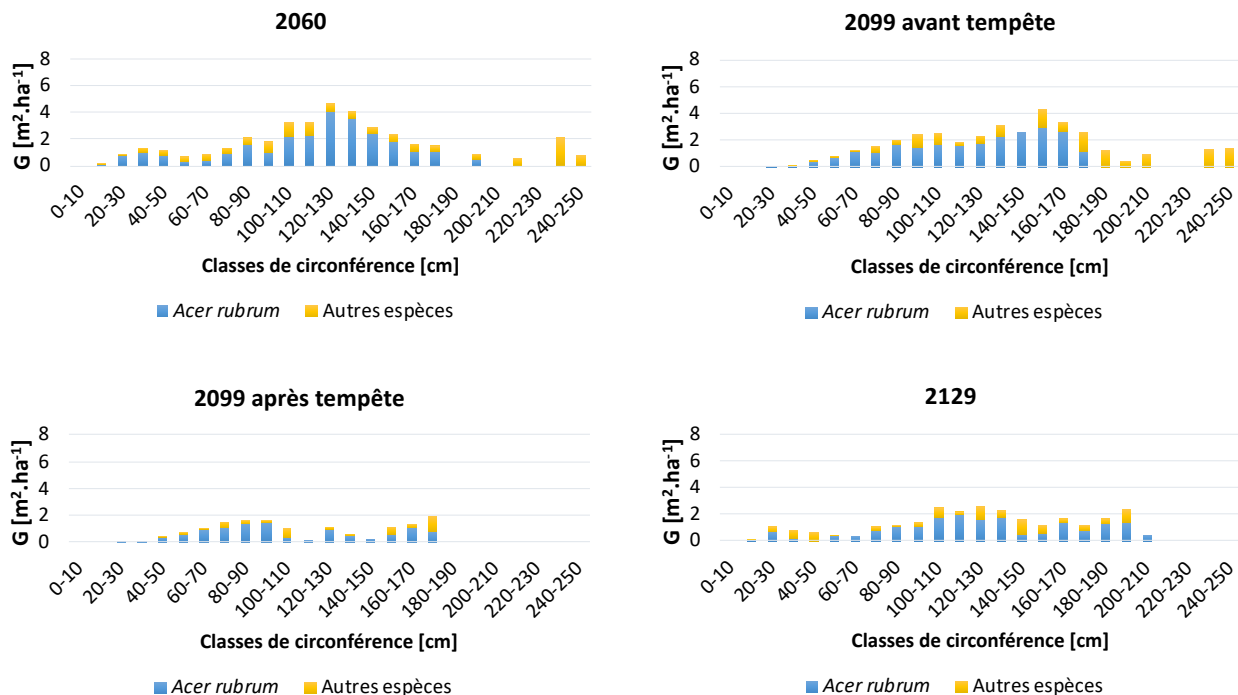


Figure 21 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement par classe de circonférence et par espèce lors du scénario de Business as usual en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).

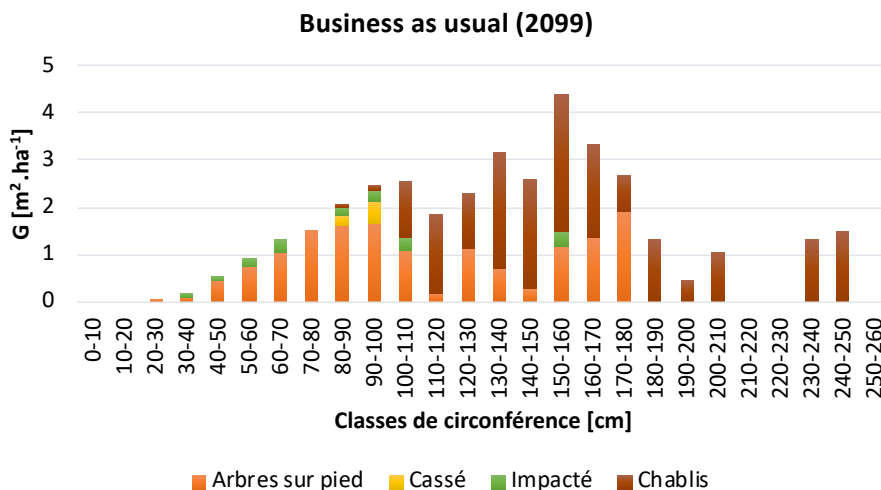


Figure 22 : Distribution de la surface terrière par classe de circonférence en 2099. Ce graphique présente les dégâts causés par la tempête de cette même année (arbres cassés, arbres impactés et chablis), ainsi que les arbres sur pied après la perturbation.

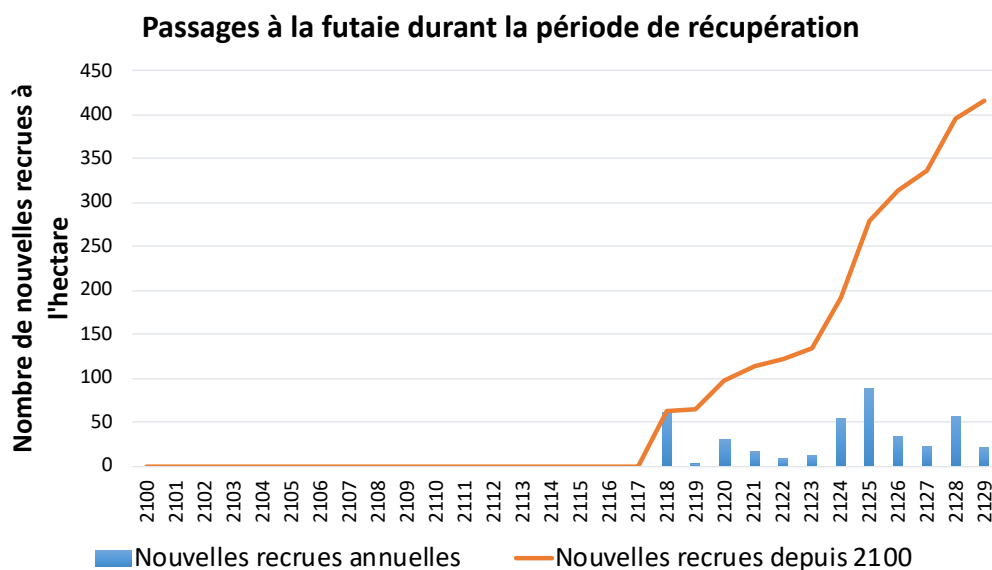


Figure 23 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2009, lors du scénario de Business as usual.

#### SCÉNARIO D'ADAPTATION MOYENNE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES (CCMOY)

Tableau 8 : Table du peuplement lors du scénario CCmoy. Les indicateurs utilisés sont les mêmes que ceux du Tableau 6.

CCmoy		Avant éclaircie/tempête				Éclaircie/tempête				Intensité et nature de la coupe/tempête			Accroissement	
Année	Hdom [m]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>avant</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>éclaircie</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	Intensité en G [%]	P/A [%]	Nature de l'éclaircie	AMPG [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]	AMPV [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]
2020	22.06	717	29.4	106	307.2	283	11.6	71.5	115.7	39.5	/	Trouées	/	/
2040	23.6	367	25.9	129	318.6	/	/	/	/	/	/	/	0.45	7.1
2060	24.61	717	38.7	154.8	474	82	16	153.6	213.1	41.3	77	Par le haut	0.59	7.7
2080	24.8	492	34.1	144.4	438.1	/	/	/	/	/	/	/	0.57	8.9
<b>2099</b>	25.17	389	38.3	156	508.1	223	26	143	356.7	67.9	154	Tempête	0.29	4.9
2119	24.36	210	17.3	132.6	224.7	/	/	/	/	/	/	/	0.25	3.7
2129	26.4	753	24.3	139	288.6	/	/	/	/	/	/	/	0.78	8.4

Le traitement sylvicole étant similaire à celui du BAU, les mêmes observations peuvent être faites de la table du peuplement du Tableau 8. La différence de scénario provient de la plantation de *Acer saccharinum* et de *Prunus serotina* en 2020, deux espèces ayant une tolérance intermédiaire à la sécheresse. Par rapport au scénario de référence NM, le peuplement montre de meilleurs accroissements en surface terrière, mais plus faibles en volume. La différence résulte de la hauteur dominante du peuplement, qui est relativement plus faible lors du CCmoy, induite par le prélèvement des gros arbres en 2020 et en 2060. En effet, pour obtenir le volume d'un arbre, il suffit de multiplier sa surface terrière par sa hauteur en tenant compte du coefficient de forme. Il est donc tout à fait possible qu'un peuplement présentant une surface terrière supérieure, ait un volume sur pied plus faible, si sa hauteur moyenne est moins élevée. En 2060, le

peuplement a des propriétés proches de celles lors du scénario BAU. Cela est d'ailleurs visible à la Figure 24 où la surface terrière est répartie en deux cohortes majoritaires dans les classes de circonférence, démontrant que la coupe a permis l'installation d'une nouvelle cohorte de régénération. Celle-ci est majoritairement composée des deux essences plantées en 2020, illustrant ainsi la réussite du processus de diversification. Trente ans plus tard, en 2099 (avant tempête), l'érable argenté semble avoir pris sa place dans les deux cohortes d'arbres matures, alors que le cerisier tardif peine à s'imposer. Cela peut s'expliquer par la sensibilité élevée du cerisier tardif à la compétition, ainsi que par sa réponse faible voire nulle à l'ouverture du couvert, contrairement à l'érable argenté (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 1998; 2000).

Avec une intensité en surface terrière de 67.9% et un P/A de 154%, la tempête semble avoir eu un impact intermédiaire des deux scénarios précédemment testés (NM et BAU). C'est-à-dire qu'elle aura causé moins de dégâts que lors du scénario NM, mais plus de dégâts qu'au BAU. Une fois de plus, le chablis aura été le dégât le plus important (Figure 25). Suite à la tempête, une augmentation de l'accroissement en surface terrière (Tableau 8) ainsi que du nombre d'individus passés à la futaie (Figure 26) a été observée entre 2119 et 2129. Le peuplement présente également une diversité bien différente entre 2020 (Figure 16) et 2129 (Figure 24). En effet, en 2129, l'érable rouge n'est plus l'essence principale, contrairement au peuplement en 2020 et 2099 (avant tempête). Deux raisons peuvent expliquer cette réduction de l'érable rouge. La première se base sur le principe que les érables rouges avaient des diamètres plus gros et des hauteurs plus élevées que les espèces introduites en 2020, lors de la tempête. Ils ont donc été plus impactés par l'évènement. De plus, les érables argentés présentent une croissance en hauteur jusqu'à trois fois plus élevée que les érables rouges, au stade de semis, ce qui explique qu'une grande partie des érables rouges se trouve encore dans les cohortes de régénération, lorsque les érables argentés sont déjà passés au stade de futaie (10 mètres ; M. Burns & H. Honkala, 2004; OMNR, 2000). Les essences reprises dans « autres espèces » de 2020 sont également relativement peu présentes lors de cette dernière année de simulation, suite aux coupes et à la tempête. Le cerisier tardif reste peu présent, contrairement à l'érable argenté qui occupe maintenant une diversité de classes de circonférence. De même que pour les deux autres scénarios, la tempête semble avoir eu l'effet d'une coupe intense, car de nouvelles recrues ont pu passer le stade de futaie, dix-huit ans après la perturbation (Figure 26). Ces passages à la futaie n'étaient composés que de pins blancs, accompagnés de quelques érables argentés, jusqu'en 2121. Les premiers cerisiers tardifs sont arrivés aux 10 mètres du stade de futaie en 2122.

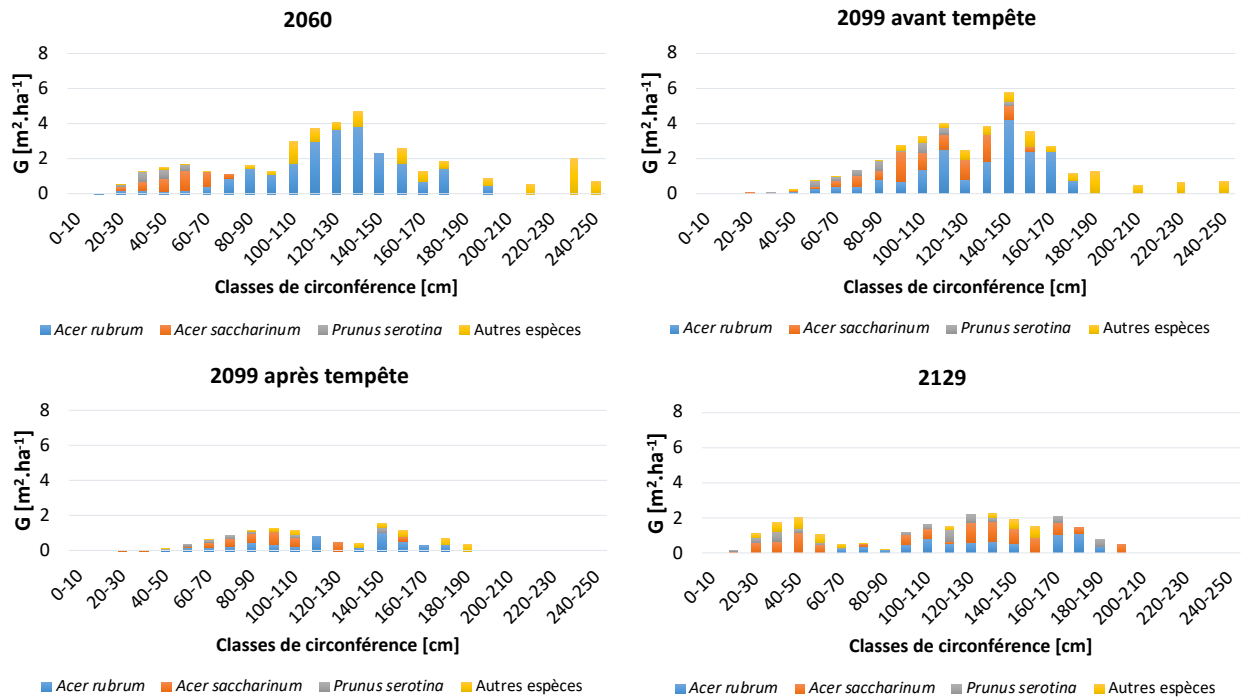


Figure 24 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).

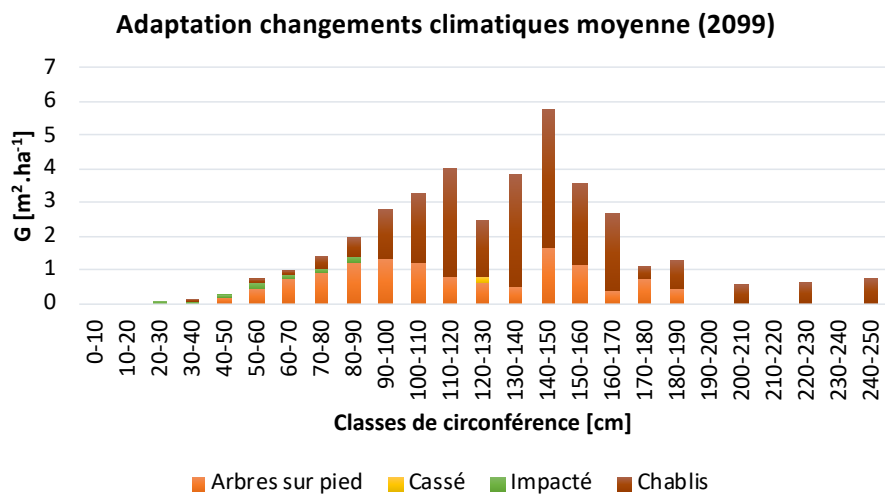


Figure 25 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099. Ce graphique présente les dégâts causés par la tempête de cette même année (arbres cassés, arbres impactés et chablis), ainsi que les arbres sur pied après la perturbation.

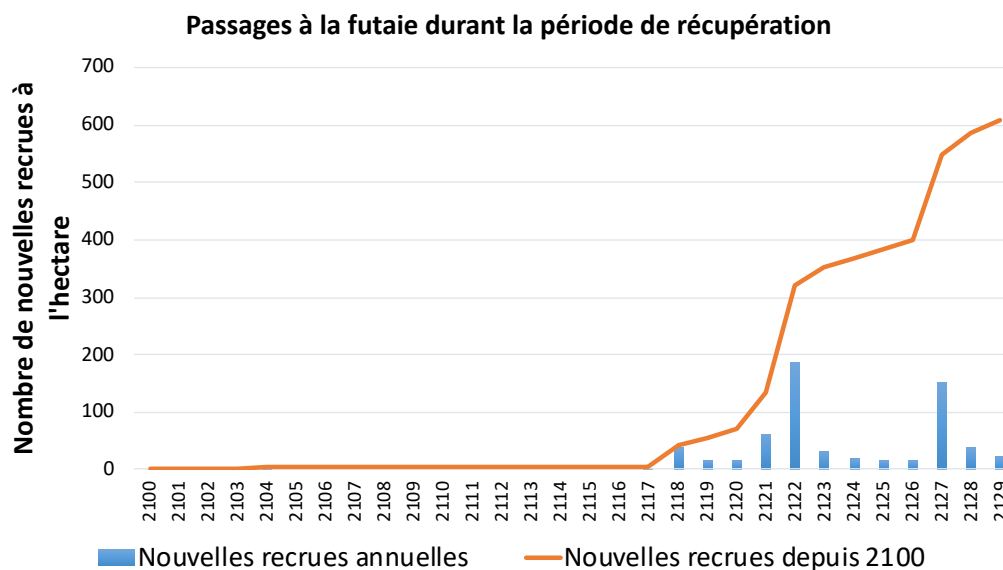


Figure 26 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2009, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques.

### SCÉNARIO D'ADAPTATION MOYENNE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET D'AUGMENTATION DE LA DIVERSITÉ FONCTIONNELLE (CCMOY + DF)

Tableau 9 : Table du peuplement lors du scénario CCmoy + DF. Les indicateurs utilisés sont les mêmes que ceux du Tableau 6.

CCmoy + DF		Avant éclaircie/tempête				Éclaircie/tempête				Intensité et nature de la coupe/tempête			Accroissement	
Année	Hdom [m]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>avant</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>éclaircie</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	Intensité en G [%]	P/A [%]	Nature de l'éclaircie	AMPG [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]	AMPV [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]
2020	22.06	717	29.4	106	307.2	283	11.6	71.5	115.7	39.5	/	Trouées	/	/
2040	23.54	365	26	139.5	320.6	/	/	/	/	/	/	/	0.46	7.2
2060	24.6	568	38.6	155.3	479.9	82	16.2	154.1	214.3	41.9	69	Par le haut	0.72	9.3
2080	25.19	432	34.5	147.5	459	/	/	/	/	/	/	/	0.64	10.15
2099	25.95	350	39.6	165.8	549.6	187	26.1	122.5	385.7	65.9	136	Tempête	0.34	6
2119	24.61	179	18.2	138.7	233	/	/	/	/	/	/	/	0.26	4.1
2129	25.34	509	22.3	142.2	272.4	/	/	/	/	/	/	/	0.55	7.3

Le scénario CCmoy + DF consiste à augmenter la diversité fonctionnelle du peuplement en l'enrichissant avec deux espèces de groupes fonctionnels non présents et ayant une tolérance intermédiaire à la sécheresse (*Quercus rubra* et *Tilia americana*). Les résultats montrent que le peuplement croît selon une même tendance que lors du CCmoy mais avec des accroissements globalement plus élevés. Lorsque le Tableau 9 est mis en parallèle avec les graphes de la Figure 27, il est tout d'abord possible d'identifier en 2060 les deux cohortes formées par les arbres matures et par la régénération passée à la futaie. Les deux essences plantées en 2020 semblent avoir une croissance différente. En effet, en 2099 avant tempête, le tilleul occupe déjà des classes de circonférence variées incluant

des classes très élevées. À l'inverse, le chêne ne dépasse pas une circonférence de 120-130 cm après le même nombre d'années. Il est intéressant de constater que la croissance plus lente du chêne lui aura permis de rester sur pied suite à la tempête. En effet, sur la Figure 27, en 2099 (après tempête) et en 2129, il est possible de constater que peu de tilleuls ont survécu à la tempête. Cela peut être dû à leur facteur d'élancement élevé (h/d). En 2129, le tilleul semble, une fois de plus, avoir grandi rapidement, alors que très peu de nouveaux chênes sont apparus dans la futaie.

L'impact de la tempête, visible à la Figure 28 et au Tableau 9, est légèrement plus faible que pour le scénario CCMoy, mais toujours plus élevé que pour le scénario BAU. Le prélèvement sur l'accroissement s'élève à 136%, et la tempête aura eu une intensité en surface terrière de 65.9%. Le chablis reste le dégât principal, surtout pour les tiges ayant les circonférences les plus élevées. Ce scénario présente, cependant, plus de tiges cassées, comparé aux quatre précédents. La presque totalité de celles-ci est composée de tilleuls, probablement en lien avec leur facteur d'élancement plus élevé, induisant plutôt une casse qu'un chablis. Comme le montre la Figure 29, dix-neuf ans auront été nécessaires au passage à la futaie de nouvelles recrues après la tempête. Celles-ci sont composées presque essentiellement de pins blancs, jusqu'en 2122. À partir de cette année, les passages à la futaie sont des pins blancs et des tilleuls d'Amérique, exclusivement.

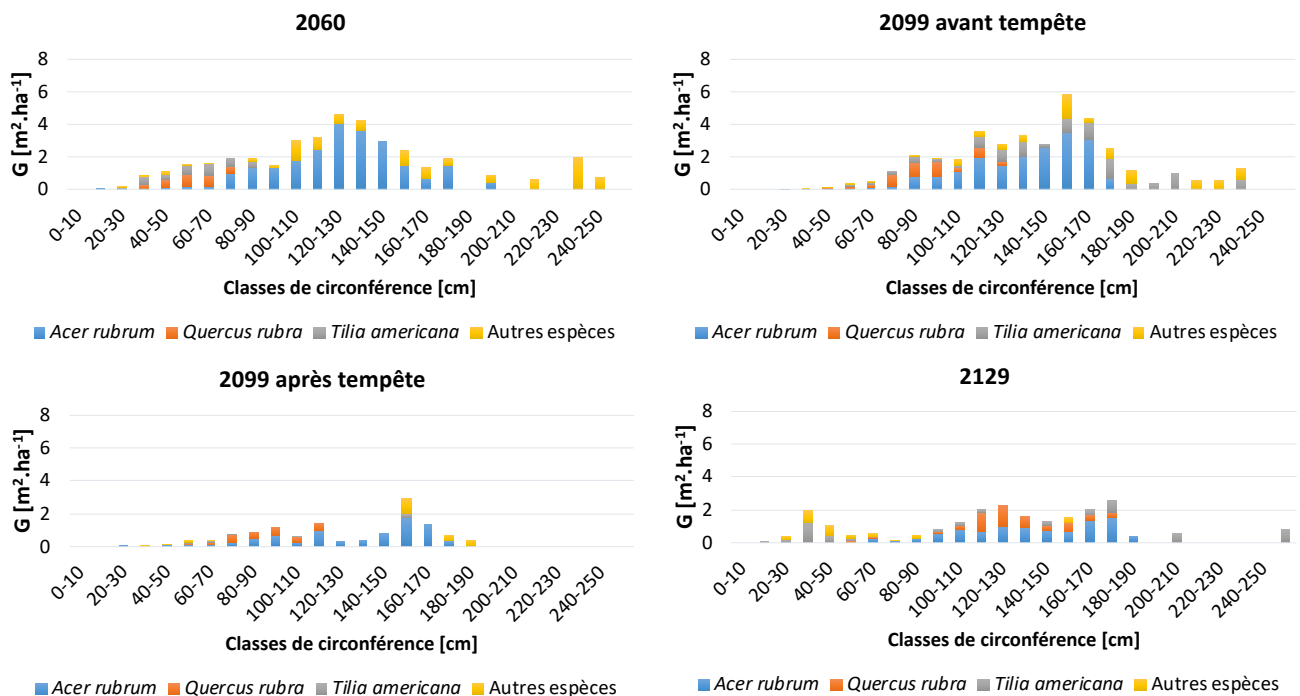


Figure 27 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).

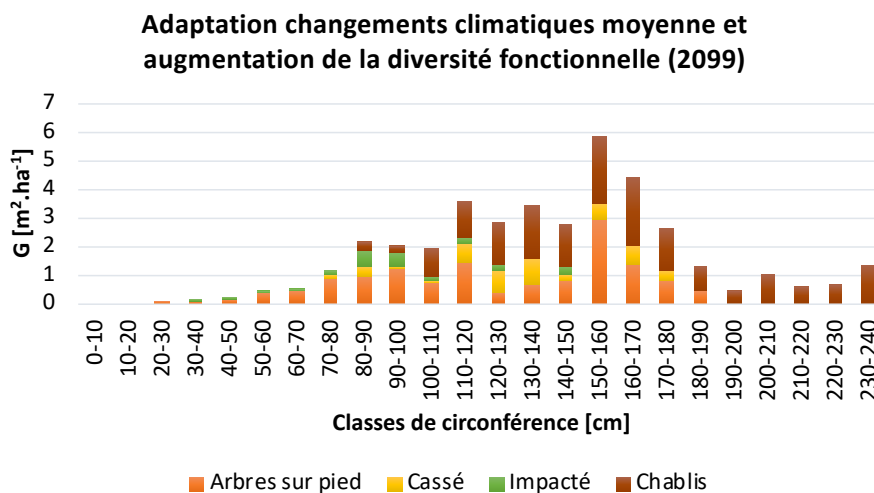


Figure 28 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099. Ce graphique présente les dégâts causés par la tempête de cette même année (arbres cassés, arbres impactés et chablis), ainsi que les arbres sur pied après la perturbation.

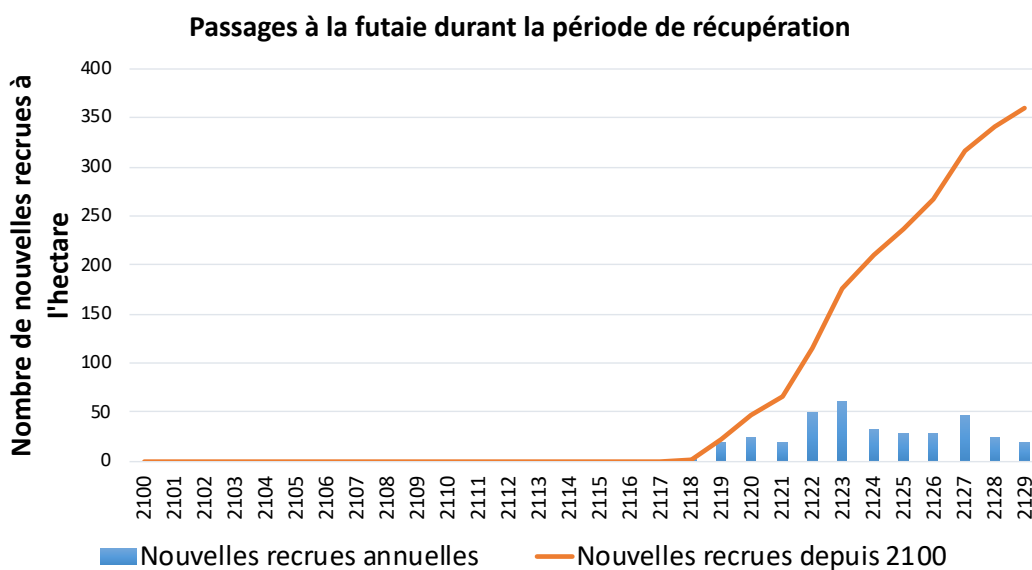


Figure 29 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario d'Adaptation moyenne aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle.

SCÉNARIO D'ADAPTATION FORTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET D'AUGMENTATION DE LA DIVERSITÉ FONCTIONNELLE (CCFORTE + DF)

Tableau 10 : Table du peuplement lors du scénario CCforte + DF. Les indicateurs utilisés sont les mêmes que ceux du Tableau 6.

CCforte + DF		Avant éclaircie/tempête				Éclaircie/tempête				Intensité et nature de la coupe/tempête			Accroissement	
Année	Hdom [m]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>avant</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	N [Nb/ha]	G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	C <sub>éclaircie</sub> [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	Intensité en G [%]	P/A [%]	Nature de l'éclaircie	AMPG [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]	AMPV [m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> ]
2020	22.04	717	29.4	106	307.2	283	11.6	71.5	115.7	39.5	/	Trouées	/	/
2040	23.59	367	26.6	130.9	327.9	/	/	/	/	/	/	/	0.48	7.5
2060	24.61	839	38.2	156.3	465.6	82	16.4	155.3	217.2	42.9	73	Par le haut	0.65	8
2080	24.76	634	33.3	146.4	410.6	/	/	/	/	/	/	/	0.61	8.6
2099	25.35	470	40.3	164	520.3	187	22.1	121.8	305.8	51	111	Tempête	0.41	5.9
2119	26.09	301	26	148.9	322.2	/	/	/	/	/	/	/	0.47	6.7
2129	26.52	537	31.3	160.3	380.9	/	/	/	/	/	/	/	0.6	7.6

Le dernier scénario testé est le CCforte + DF. Il consiste à augmenter la diversité fonctionnelle du peuplement, en l'enrichissant avec deux espèces de groupes fonctionnels non présents et ayant une tolérance élevée à la sécheresse (*Carya cordiformis* et *Quercus macrocarpa*). Dans la table du peuplement du Tableau 10, les accroissements avant tempête sont dans une gamme similaire aux autres scénarios, bien que certains ont démontré des accroissements légèrement plus élevés. En revanche, c'est le seul scénario présentant des accroissements similaires sur les 20 ans précédant et les 20 ans suivant la perturbation. Cela peut être dû au peu de chênes à gros fruits ayant été impactés par la tempête. Ceux-ci ont donc pu profiter de l'ouverture du couvert, moteur d'un accroissement plus élevé après la tempête (Truax 2021). Une analyse de la Figure 30 démontre qu'en 2099 (avant tempête), le *Quercus macrocarpa* surpasse le *Carya cordiformis* en termes de surface terrière. Cependant, les deux espèces semblent avoir une croissance similaire car ils ont atteint des classes de circonférence similaires sur une même période.

La tempête, dont les dégâts peuvent être observés au Tableau 10, à la Figure 30, et à la Figure 31, a eu le moins d'impact, tous scénarios confondus. En effet, le P/A est le plus faible, 111% et 51% de la surface terrière a été prélevée (ce qui reste, néanmoins, plus élevé que lors d'une coupe traditionnelle). Le type de dommage principal des arbres de plus grosse circonférence est le chablis, alors que les arbres de circonférence plus faible sont impactés par la chute des plus gros arbres (Figure 31). La distribution des tiges du peuplement après la tempête démontre que peu d'individus des essences introduites en 2020 ont subi un impact (Figure 30). Cela résulte, en partie, de leurs petites dimensions, moins aptes à se faire toucher directement par une tempête, mais également indirectement par la protection offerte par le gainage des arbres dominants d'érables

rouges et de pins blancs, majoritairement. En 2129, l'érable rouge est toujours très présent dans le peuplement, accompagné majoritairement par du chêne à gros fruits. Le caryer semble peu présent dans le peuplement final. De nouvelles recrues ont pu s'installer et passer à la futaie à partir de dix-huit ans après la tempête (Figure 32). Celles-ci sont majoritairement composées d'érables rouges et de pins blancs, ne laissant donc pas grande place à la diversification attendue lors de ce scénario, dans la deuxième cohorte (Figure 30).

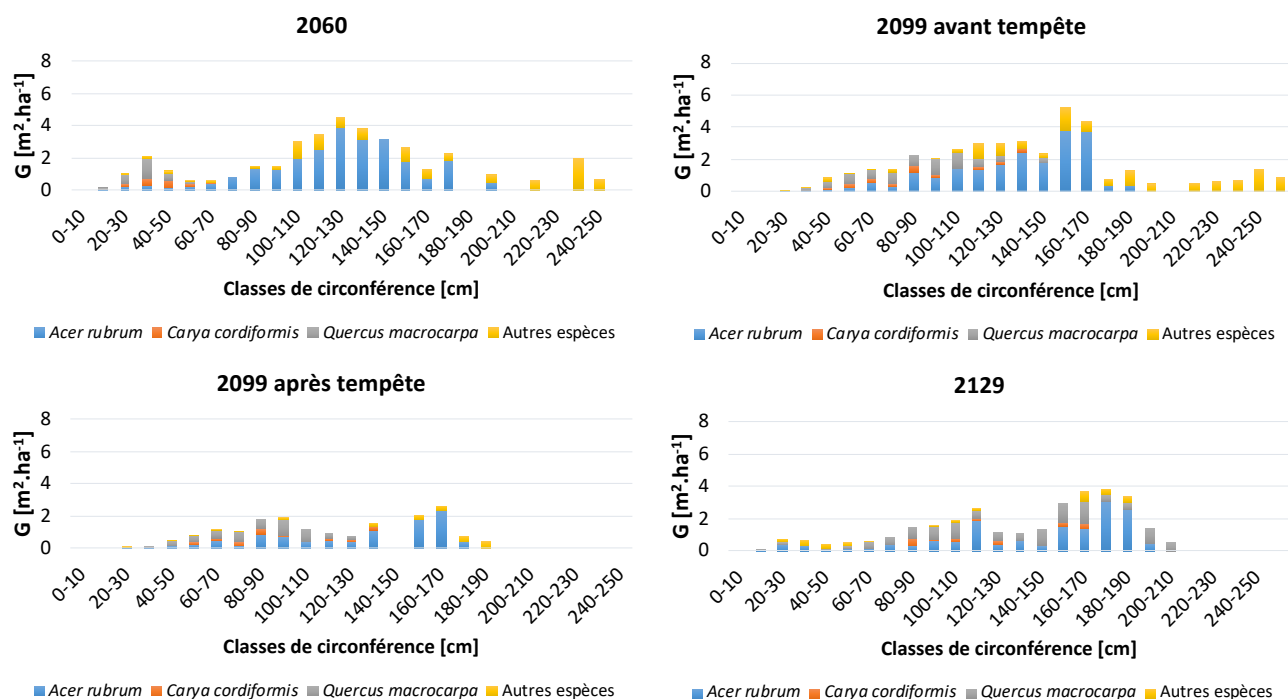


Figure 30 : Distribution de la surface terrière des arbres de futaie du peuplement, par classe de circonférence et par espèce, lors du scénario d'Adaptation forte aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle, en 2060 (40 ans après le début des simulations), en 2099 avant et après tempête (79 ans après le début des simulations) et en 2129 (109 ans après le début des simulations).

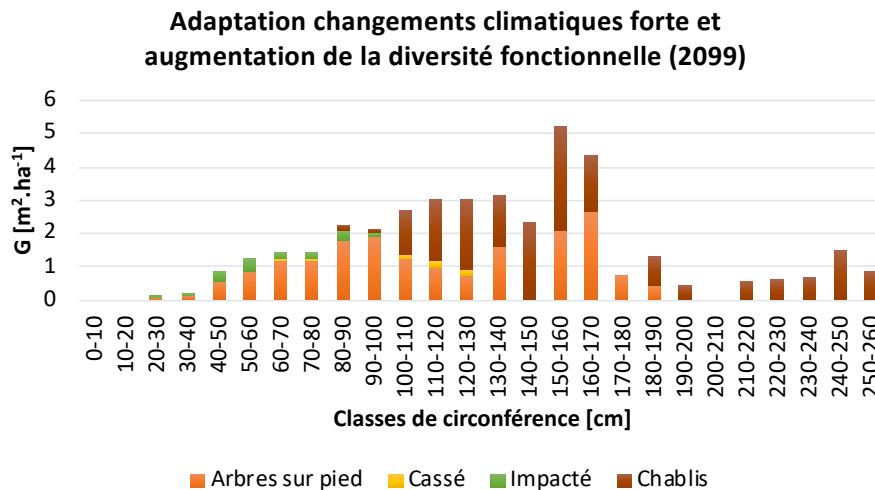


Figure 31 : Distribution de la surface terrière, par classe de circonférence, en 2099. Ce graphique présente les dégâts causés par la tempête de cette même année (arbres cassés, arbres impactés et chablis), ainsi que les arbres sur pied après la perturbation.

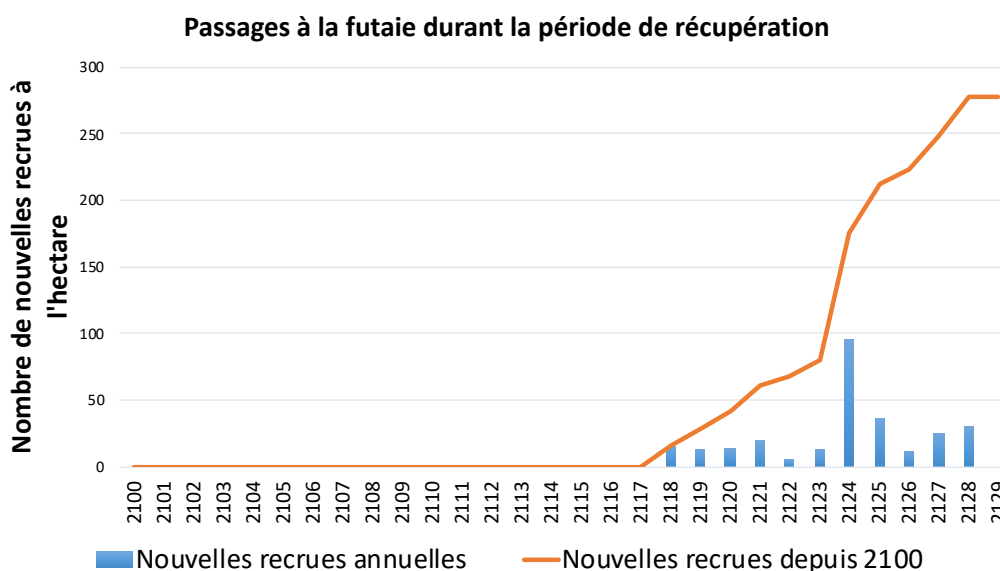


Figure 32 : Évolution du nombre de nouvelles recrues à l'hectare, durant la période de récupération du peuplement après la tempête de 2099, lors du scénario d'Adaptation forte aux changements climatiques et d'augmentation de la diversité fonctionnelle.

#### 5.4. CONTRIBUTION DES ESPÈCES INTRODUITES

Tableau 11 : Contribution, en surface terrière, des essences introduites en 2020, dans les différents scénarios. Le  $G_{\text{espèce}}$  [ $m^2 \cdot ha^{-1}$ ] représente la surface terrière occupée par l'essence en 2099 (avant tempête), et en 2129 (fin de la simulation), et le  $G_{\text{tot}}$  [ $m^2 \cdot ha^{-1}$ ], la surface terrière totale occupée par les arbres de futaie lors de ces mêmes années. La contribution de l'espèce est le rapport entre  $G_{\text{espèce}}$  et  $G_{\text{tot}}$  [%].

Scénario	Essence (français)	Essence (latin)	2099 (avant tempête)			2129		
			$G_{\text{espèce}}$	$G_{\text{tot}}$	Contribution de l'espèce	$G_{\text{espèce}}$	$G_{\text{tot}}$	Contribution de l'espèce
CCmoy	Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>	9	38.3	23.5	9.5	24.3	39.1
	Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i>	2.8		7.3	3.7		15.2
CCmoy + DF	Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i>	9.3	39.6	23.5	5	22.3	22.4
	Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>	4		10.1	5.4		23.8
CCforte + DF	Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i>	1.8	40.3	4.5	2.1	31.3	6.7
	Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i>	6.3		15.6	11.2		35.8

La différence entre les scénarios d'enrichissement provient des essences plantées en 2020. En analysant donc la résilience du peuplement, selon ces différentes méthodes de gestion adaptative, la contribution des espèces introduites doit être prise en compte. À la fois car il est attendu que ces introductions modifient le cours du cycle sylvicole du peuplement, mais aussi parce qu'il est possible que l'une ou l'autre n'ait pas pu s'installer en suffisance, n'impactant donc pas la résilience du peuplement. Le Tableau 11 permet, donc, d'identifier le poids de chacune de ces nouvelles espèces, en 2099 (avant la tempête), et en 2129 (fin de la simulation), bien que cette analyse ait déjà pu être observée sur les graphiques de la section précédente, 5.3. Analyse de scénarios.

Lors du scénario « CCmoy », le *Prunus serotina* contribue environ trois fois moins au peuplement, en 2099, que l'*Acer saccharinum*. Cependant, trente ans après la tempête, les deux espèces ont pu prendre une place plus importante dans le peuplement, bien que la surface terrière de l'érable s'élève à plus du double de celle du cerisier. Cette augmentation soudaine du cerisier tardif provient certainement de l'ouverture du couvert, induite par la tempête. En effet, cette essence est intolérante à l'ombrage (Place 1952). Lors de la plantation de 2020, les trouées ne permettaient certainement pas assez de passage de la lumière, pour que le cerisier ne s'installe assez bien, contrairement à la tempête de 2099. Il est donc possible d'imaginer que l'introduction de ces deux espèces aura eu un impact non-négligeable sur l'évolution du peuplement.

Pour le scénario « CCmoy +DF », le *Tilia americana* occupe plus de deux fois plus de surface que le *Quercus rubra* en 2099. Il est cependant intéressant de constater que cette tendance s'est inversée en 2129, soit trente ans après la tempête. En effet, lors de cette dernière année, les deux essences occupent une place similaire en termes de surface terrière dans le peuplement. Cela signifie que la tempête a plus impacté le tilleul, mais que le chêne a présenté une bonne réponse à la perturbation. Il est donc possible que les deux essences aient eu un impact dans le cycle du peuplement.

Enfin, le scénario « CCforte + DF » introduisait du caryer cordiforme et du chêne à gros fruits. La première essence n'est que très peu représentée en 2099, avec moins de 5% de contribution dans le peuplement. La deuxième occupe une place trois fois plus grande, lors de cette année. Trente ans plus tard, le *Carya cordiformis* a pu prendre légèrement plus de place, mais reste l'espèce la moins représentée, tous scénarios confondus. Le *Quercus macrocarpa*, quant à lui, a pris une place beaucoup plus importante dans le peuplement final. Il est donc difficile de déterminer si le *Carya cordiformis* a pu contribuer ou non à la résilience du peuplement, au vu de ses faibles proportions. La place importante du *Quercus macrocarpa* devrait induire une contribution plus forte de cette espèce.

## 5.5. ANALYSE DE LA RÉSILIENCE

L'analyse de la résilience du peuplement, selon les différents scénarios, a pu se faire à l'aide d'indicateurs. Ainsi, l'indice de surface foliaire (LAI), la surface terrière (G) et la productivité primaire nette (PPN) ont servi aux différents calculs de résilience (Figure 34). L'évolution des deux premiers indicateurs, lors de la période de récupération après tempête, est présentée à la Figure 33, et l'évolution du PPN en Annexe 8. L'Annexe 9 présente les évolutions et moyennes d'indicateurs supplémentaires : le stock de carbone, l'indice de diversité de Simpson et l'évapotranspiration.

Pour l'analyse de ces indicateurs, en vue d'identifier quel scénario sylvicole a permis la meilleure réponse face à la tempête, un premier critère concerne la résistance du peuplement. Pour rappel, la résistance traduit la réponse du peuplement directement après la tempête. Elle peut donc être évaluée sur base du rapport entre la valeur des indicateurs en 2099 après et avant perturbation (Figure 33), et relativement entre les différents scénarios sur les graphes 'Résistance' de la Figure 34. L'analyse combinée de ces deux figures, ainsi que de l'Annexe 8 permet d'identifier une meilleure résistance du peuplement lors du scénario CCforte + DF, pour tous les indicateurs. Cela signifie que ce scénario aurait permis au peuplement de limiter les dégâts directement liés à la tempête. Cette conclusion confirme les résultats de la section 5.3. Analyse de scénarios, où il était possible de comparer les impacts de la tempête sur les différents scénarios.

Le deuxième critère de résilience concerne la récupération du peuplement, après la tempête. Contrairement à la résistance, qui caractérise la réponse immédiate de celui-ci, la récupération œuvre sur le temps postérieur à l'évènement. Ainsi, un taux de récupération relatif élevé, et un temps de récupération faible sont la combinaison d'une récupération efficace. De façon globale, les temps de récupération semblent assez longs. Or, en conditions réelles, on peut s'attendre à une densité de semis beaucoup plus élevée suite à l'ouverture du couvert après une perturbation (Dietz 2020), entraînant des valeurs plus élevées de G, LAI ou PPN, par la suite, et donc des temps de récupération plus courts. Cette différence pourrait être expliquée par la façon dont la régénération a été définie au cours des simulations. En effet, la régénération apparaît sous forme de cohortes de semis où l'utilisateur détermine au préalable les caractéristiques de la/des cohorte(s) (espèce, hauteur et diamètre moyens, densité) et l'intervalle de temps auquel elles réapparaissent dans le peuplement. Dans les simulations, les cohortes reviennent tous les 5 ans, avec une densité de 8 semis/cellule (qui correspond à la densité de semis de plus d'un an du peuplement de départ, relativement fermé) et une composition en espèces qui varie proportionnellement aux essences présentes dans la futaie. Cela s'observe d'ailleurs par la contribution très faible de la régénération et des nouvelles recrues durant la phase de récupération (Figure 33 ; Annexe 8).

Sur base des Figure 33, Figure 34 et de l'Annexe 8, le BAU est le scénario présentant le meilleur taux de récupération, concernant la G et la PPN, et le CCmoy pour le LAI, et la moyenne. Ces scénarios sont donc ceux ayant pu récupérer au mieux, pour l'indicateur concerné, sur les trente ans de simulation post-perturbation. Le BAU et le CCmoy sont, en moyenne, les scénarios ayant le meilleur temps de récupération. Le CCmoy a un temps de récupération plus faible pour le LAI, le BAU pour la PPN et le CCforte + DF pour la G. Cela se traduit par une capacité plus rapide à revenir à l'état pré-perturbation, pour l'indicateur en cause. En combinant le taux et le temps de récupération, le CCmoy est le scénario présentant une meilleure récupération globale, suite à la tempête. Cette conclusion correspond au nombre d'arbres passés à la futaie, plus élevé pour le scénario CCmoy, que pour les autres (excepté le NM).

L'analyse de la Figure 34 dans son ensemble montre qu'une bonne récupération n'est pas toujours associée à une bonne résistance. Le meilleur exemple est celui du CCmoy, dont la résistance concernant le LAI est la moins bonne, mais qui aura présenté le meilleur taux de récupération et le temps de récupération le plus rapide. La résilience relative permet de combiner ces différents indicateurs et d'en tirer des conclusions générales. La dernière série de graphes de la Figure 34 montre la résilience relative moyenne et pour G la plus élevée lors du scénario CCforte + DF. Les scénarios CCmoy et

BAU démontrent également une meilleure résilience, en termes de LAI et de PPN, respectivement.

Les meilleurs scénarios ayant été définis, il reste à identifier le scénario présentant les moins bons résultats. De façon globale, le NM est le moins bon scénario pour tous les indicateurs, exception faite pour la G, dans la Figure 34. En réalité, au vu des dégâts causés par la tempête, lors de ce scénario, le NM est également le scénario permettant une moins bonne résistance, récupération et résilience relative. Cette différence, dans la Figure 34 provient de l'utilisation d'un  $V_{pre}$  moyen, pour tous les scénarios (Cf. 4.5.3. Évaluation de la résilience). En effet, si le  $V_{pre}$  spécifique au scénario NM est utilisé, celui-ci présente les moins bons facteurs de résilience, pour tous les indicateurs, y compris la G, car plus de mortalité liée à la tempête. Le choix de l'utilisation du  $V_{pre}$  standardisé est en lien avec l'affranchissement des différences de scénarios. Comme dans ce cas où le matériel sur pied avant tempête est bien plus élevé pour le NM, car aucune coupe n'est réalisée, mais où le matériel sur pied après tempête est dans une gamme similaire aux autres scénarios (Figure 33).

Les valeurs moyennes des indicateurs descriptifs de l'Annexe 9, peuvent venir compléter cette analyse de résilience. Ainsi, l'impact de la tempête est démontré par la chute du stock de carbone, pour tous les scénarios. Cela n'est pas étonnant, car cet indicateur est directement en lien avec le volume, et donc également avec le volume d'arbres endommagés par la tempête. Le CCforte + DF semble, néanmoins, être le scénario permettant le moins de pertes de carbone, ce qui est cohérent avec la meilleure résistance de ce scénario, ainsi que la meilleure remontée, sur le temps imparti. L'indice de Simpson décrit la diversité du peuplement. Pour les scénarios CCmoy et CCforte + DF, l'indice augmente très peu après la tempête, car celle-ci a impacté de manière plutôt homogène toutes les essences, et que toutes celles-ci se régénèrent. Le scénario CCmoy + DF voit son nombre de chênes rouges, peu présents avant la perturbation, augmenter sensiblement après la tempête. Cela augmente le poids de cette espèce dans l'indice de Simpson, et donc l'indice en lui-même. Concernant la période entre 2020 et 2060, l'indice de Simpson augmente lors des trois scénarios d'enrichissement, grâce aux plantations de 2020. La coupe de 2060 induit également une très forte remontée, car la coupe de cette-même année ne concerne pratiquement que des érables rouges et des pins, ce qui rééquilibre la proportion de chaque espèce. Enfin, l'évapotranspiration est un indicateur très variable au cours du temps. Les graphes de l'Annexe 9 démontrent que l'ET remonte toujours, en moyenne, après la tempête, sauf pour le CCforte + DF. Mais il convient également de remarquer que l'impact de la tempête ne semble pas à l'origine de cette montée. En effet, l'indicateur semble en constante élévation, lors de tous les scénarios. Cela peut s'expliquer par l'augmentation des températures, au cours du scénario météorologique. Une

hypothèse pourrait alors être posée, concernant le fait que le scénario CCforte + DF permet une atténuation de cette montée de températures, comme il est le seul dont la moyenne diminue.

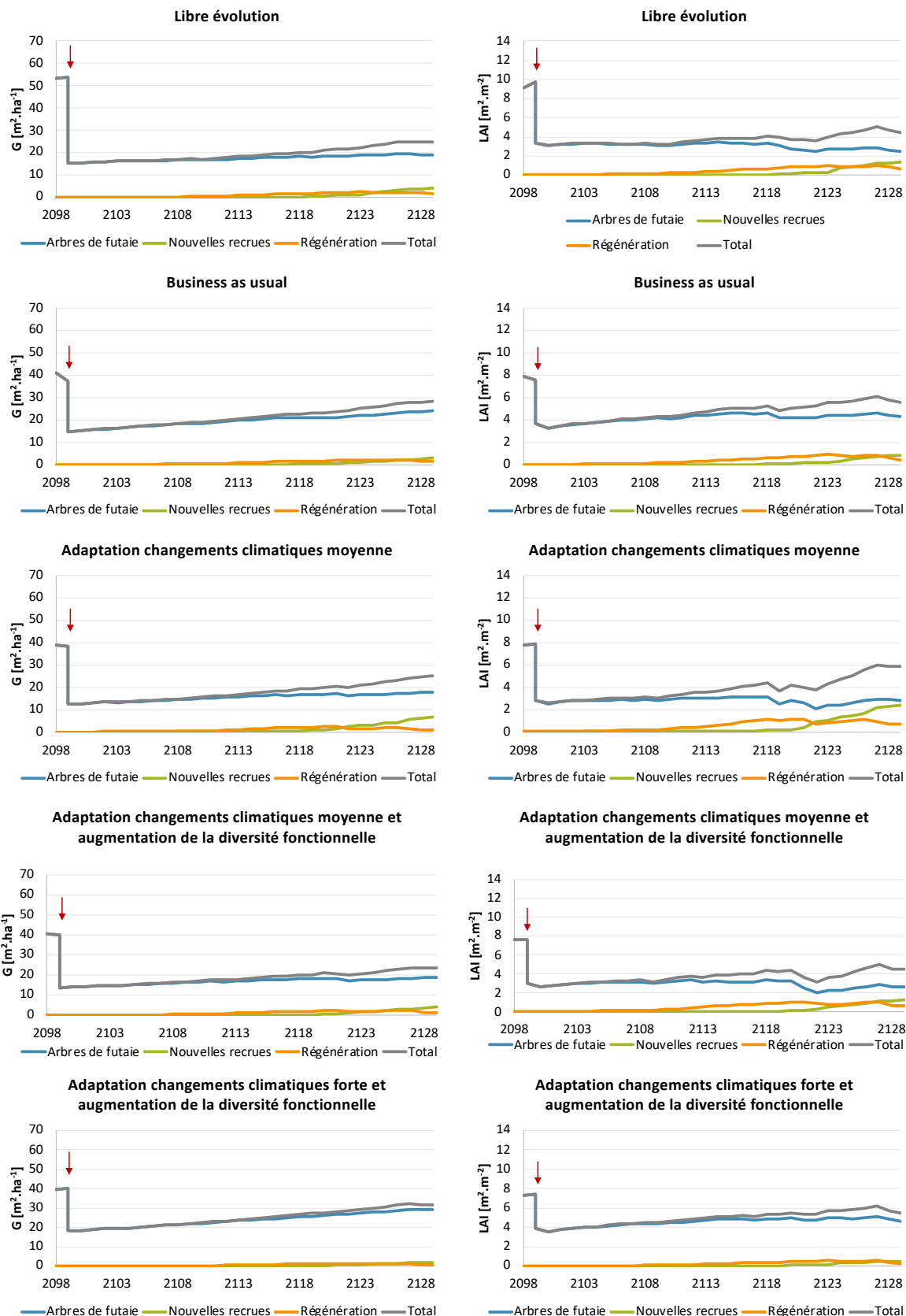


Figure 33 : Évolution de la surface terrière ( $G$ ), à gauche, et de l'indice de surface foliaire ( $LAI$ ), à droite, pour les différents scénarios. Les graphes permettent d'évaluer la contribution des arbres de futaie, en bleu, des nouvelles recrues, en vert, c'est-à-dire les arbres nouvellement passés en futaie lors de cette période de récupération, et de la régénération, en orange.

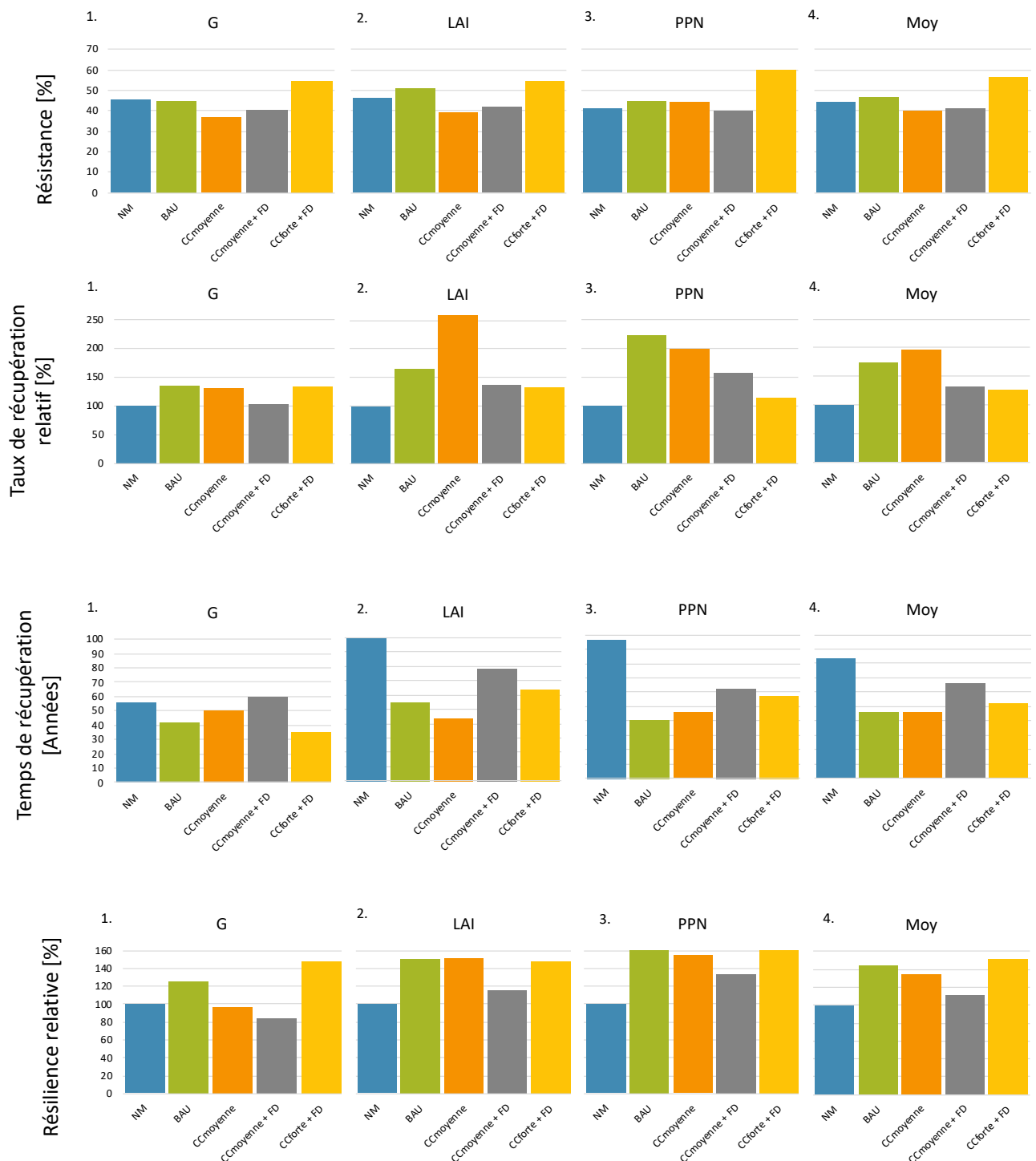


Figure 34 : Résultats de l'analyse de la résilience du peuplement, pour les différents scénarios sylvicoles appliqués. Pour chaque critère, à savoir, la résistance [%], le taux de récupération relatif [%], le temps de récupération [Années] et la résilience relative [%], trois indicateurs ont été testés. La surface terrière, G [m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>], l'indice de surface foliaire, LAI [m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>] et la productivité primaire nette, PPN [gC.m<sup>-2</sup>]. La moyenne des trois indicateurs, pour chaque scénario, est représentée lors de la quatrième série de graphes, pour chaque critère de résilience. Pour le taux de récupération relatif et la résilience relative, le scénario de Libre évolution (NM) a été pris comme référence. C'est pourquoi il est à 100%, et les autres scénarios peuvent dépasser cette valeur.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 6.1. LA MODÉLISATION COMME OUTIL D'ADAPTATION DES ÉRABLIÈRES ROUGES DU CENTRE-DU-QUÉBEC FACE AUX TEMPÊTES ET AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

HETEROFOR, modèle employé pour la réalisation des différentes simulations, est un outil facile d'utilisation et intuitif. Il a le potentiel d'accueillir une large gamme d'interventions, permettant donc d'imaginer une quantité de simulations différentes. Il est, cependant, sensible à la moindre erreur et son initialisation et paramétrisation doivent être minutieuses et prennent beaucoup de temps. HETEROFOR fait partie des pistes permettant aux sylviculteurs d'élaborer des stratégies d'adaptation face aux changements climatiques qui se profilent, et face aux tempêtes.

La modélisation est un outil performant et rapide, permettant d'imaginer et de tester des chemins de réflexion en vue de la prise de décision face aux changements climatiques. Cependant, il n'en reste pas moins difficile d'en tirer des conclusions, au vu de la variabilité de conditions qu'il est possible de rencontrer sur le terrain. Chaque peuplement est en effet spécifique, et il est impossible de prédire avec précision les aléas biotiques et abiotiques auxquels il devra faire face. Les stratégies appliquées lors des simulations sur les érablières rouges du Centre-du-Québec permettent, dans le cadre de ce mémoire de répondre à deux questions : « Quelle stratégie assure une meilleure résilience des érablières rouges ? » et « Dans le cas d'un enrichissement, quelles essences faut-il choisir ? ».

Pour répondre à la première question, une observation permet d'orienter la réflexion, en commençant par répondre à « Quelle stratégie ne faut-il **pas** choisir ? ». En effet, lors des analyses de résilience du peuplement, le scénario ayant témoigné des moins bons résultats était celui de Libre évolution (NM). Cela signifie que, face à une tempête et dans un contexte climatique extrême, la gestion forestière est un élément important et significatif. Ces simulations démontrent le rôle du sylviculteur et de l'irrégularisation des peuplements, dans la gestion durable des forêts. En effet, le NM était le seul scénario à rester sous forme de futaie régulière, en l'absence de coupes. Le caractère régulier et la forte densité de capital sur pied en 2099 ont induit les plus gros dommages suite à la tempête, et la moins bonne résilience.

Il est donc, à ce stade, certain que le choix devra se porter sur le Business as usual (BAU, continuité de la sylviculture pratiquée ces dernières décennies) ou sur les scénarios d'enrichissement. Le scénario BAU a démontré des résultats plutôt intéressants. En effet, il tient globalement un rôle de « deuxième place » en termes de résistance, récupération

et résilience relative, et est, en moyenne, le scénario permettant le temps de récupération le plus court. Il semble donc possible de continuer à appliquer une gestion identique à la gestion actuelle pour les années à venir. Toutefois, il est intéressant de se poser la question de la durabilité de cette méthode sylvicole. En effet, dans le cas d'une seule perturbation, sous forme de tempête, dans un contexte climatique tel que le RCP8,5 du GIEC, le Business as usual a démontré de bons résultats. Cependant, au vu de la quantité de dégâts causés par cette tempête lors de ce scénario, il est important d'anticiper si ce scénario permet une longévité du peuplement. Par exemple, dans le cas d'un deuxième événement climatique extrême, il n'est pas certain que le peuplement sera toujours aussi résilient. Bien sûr, cette question se pose pour tous les scénarios, mais il est tout de même possible d'imaginer de meilleurs résultats.

Viennent alors les scénarios impliquant un enrichissement. Le CCmoy est celui ayant démontré une meilleure récupération, globalement. Pour rappel, ce scénario impliquait un enrichissement d'espèces plus adaptées aux changements climatiques, sans modifier le nombre de groupes fonctionnels au sein du peuplement. Il apparaîtrait que les essences introduites ont pu s'installer durablement au sein du peuplement. L'érable argenté et le cerisier tardif contribueraient donc certainement à une meilleure récupération du peuplement. L'érable, tout d'abord, par sa croissance rapide (notamment au stade de régénération) ayant permis d'installer rapidement une nouvelle cohorte, suite à la tempête. La croissance en hauteur plus lente du cerisier lui a permis de s'installer dans le sous-étage, et ainsi d'éviter d'être renversé par la tempête, qui touche majoritairement les arbres plus hauts et plus gros. Avec moins d'arbres impactés, ceux restants ont pu continuer leur croissance afin d'atteindre la cohorte supérieure après la tempête

Cette même tendance a pu être remarquée dans le scénario CCmoy + DF, où le tilleul d'Amérique profite d'une croissance rapide, et le chêne rouge d'Amérique d'une croissance plus lente. La grosse différence réside néanmoins dans le fait que la presque totalité des tilleuls a été impactée par la tempête. Cela a donc réduit la diversité et la croissance du chêne rouge ne lui a pas permis de prendre assez vite le relai. Même si la contribution en surface terrière de chacune de ces essences a pu atteindre environ 20% en 2129, ce scénario semble avoir eu des résultats moins positifs que lors du Business as usual. Ceci indique donc que les stratégies d'adaptation peuvent avoir un impact positif sur la résilience de la forêt, si le choix des essences est optimal. Si ce n'est pas le cas, il pourrait avoir un effet inverse.

Enfin, le scénario CCforte + DF impliquait un enrichissement avec du caryer cordiforme et du chêne à gros fruits. Ces deux essences témoignent d'une croissance

équivalente, mais n'ont pas la même réponse à la compétition. C'est pourquoi le caryer est moins représenté que le chêne. Leur croissance plus lente que celle des essences introduites lors des deux autres scénarios, leur a permis d'acquérir plus de stabilité face à la tempête. Ainsi, peu d'individus de ces espèces ont été touchés, ce qui a certainement contribué à la meilleure résistance et résilience du peuplement. Ce scénario n'a permis l'installation que de très peu de régénération, au cours de la simulation. Cette absence de régénération explique que ce scénario ait un taux et un temps de récupération moins bons, bien qu'une meilleure résistance et résilience.

Dans le choix de stratégies à adopter, il n'existe pas de différence considérable entre les scénarios d'enrichissement, et le BAU. Pour identifier le réel impact de la diversité (et redondance) fonctionnelle, et de l'adaptation des espèces introduites aux changements climatiques, il s'agirait d'identifier la réponse des peuplements dans le cas de perturbations répétées, au cours du temps. Dans le cas d'une seule perturbation, comme la tempête de 2099, l'analyse se porte surtout sur l'augmentation de la diversité spécifique, et du choix entre les différentes espèces introduites. La similarité remarquée entre les scénarios d'enrichissement et le scénario de référence (BAU) s'explique principalement par la diversité préexistante du peuplement dans le cadre du scénario de référence. Les différences observées, au sein des scénarios, sont principalement issues des propriétés spécifiques aux espèces introduites : leur résistance aux tempêtes, leur tolérance à l'ombrage, leur vitesse de croissance, etc. Une autre limite de l'approche peut expliquer le peu de différence entre les scénarios : la faible prise en compte du stress hydrique, au sein d'HETEROFOR. La tolérance à la sécheresse des essences introduites est directement liée aux mécanismes mis en place par l'espèce pour répondre à un déficit hydrique. En cas de sécheresse, le stress hydrique peut entraîner la cavitation des vaisseaux du xylème, et leur embolie (Hernandez-Santana et al. 2023). Ce phénomène induit une chute prématurée des feuilles et une mortalité des branches. Cependant, ce mécanisme n'est que peu pris en compte dans HETEROFOR. Une meilleure sensibilité du modèle au stress hydrique induirait potentiellement des effets plus importants de la sécheresse sur les espèces, permettant, de ce fait, d'identifier de façon plus concrète la résistance et les interactions des espèces plus résistantes.

## 6.2. AMÉLIORATIONS ET PERSPECTIVES

L'approche testée lors de ce mémoire fait preuve de plusieurs limites, et ne conclut pas en un choix de gestion spécifique à adopter face aux tempêtes et aux changements climatiques. Il est possible d'améliorer les réponses et conclusions pouvant être tirées des approches de diversification fonctionnelle et d'adaptation aux changements climatiques, par des pistes d'amélioration de la sylviculture et du modèle HETEROFOR.

Concernant les méthodes de gestion sylvicole appliquées, une **sylviculture plus dynamique** pourrait être envisagée. Cela permettrait une meilleure croissance globale du peuplement, ainsi qu'une meilleure installation de la régénération. Il est possible de réaliser des coupes plus fréquentes, telles qu'en sylviculture européenne, permettant une meilleure mise en lumière du sous-étage. De plus, d'autres schémas de régénération peuvent être pensés dans HETEROFOR. En effet, la régénération revenait tous les cinq ans, à raison de huit plants par cellule. La régénération pourrait certainement mieux s'installer si plus de plants revenaient plus souvent.

Les scénarios CCforte + DF et CCmoy sont ressortis comme étant les meilleures stratégies d'adaptation de l'érablière rouge. Cependant, il serait intéressant de trouver un scénario combinant les deux. Pour cela, la plantation de nouvelles essences pourrait être envisagée. Différentes **combinaisons des essences plantées** lors de ces deux scénarios pourraient également être testées, au lieu de s'en tenir à deux nouvelles essences.

Dans l'analyse de la résistance des espèces, il serait également intéressant d'examiner la **compatibilité ou l'incompatibilité entre les traits spécifiques** aux essences. En effet, il est possible qu'une meilleure tolérance à la sécheresse d'une espèce s'accompagne d'effets limitants. Parmi ceux-ci, un système racinaire moins développé, réduisant sa capacité d'absorption de l'eau (McDowell et al. 2008), une croissance ralentie (Sala et al. 2000), une diminution de la productivité photosynthétique (McDowell et al. 2008), etc. Cependant, aucune étude ne recense, actuellement, de données pour les espèces concernées dans ce mémoire.

Afin de tester la réelle utilité de la diversité et de la redondance fonctionnelle, des simulations à **perturbations multiples et aléatoires** pourraient être utiles. L'effet de tempêtes extrêmes répétées renforcera la sensibilité du peuplement, et permettra certainement d'identifier les comportements des espèces plus résistantes. Les perturbations répétées pourraient également permettre d'identifier les effets d'une **perte de groupe fonctionnel** (avec et sans redondance fonctionnelle).

Enfin, lors des simulations, **l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>** a été évité en maintenant constant la concentration atmosphérique du gaz. Cependant, il est attendu que cette concentration augmente avec les changements climatiques. Il serait donc intéressant d'utiliser les prédictions du GIEC, concernant cet élément, tout en tenant compte du fait que l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pourrait être contraint par la disponibilité en nutriments.

Au-delà des pistes d'améliorations concernant les stratégies sylvicoles, des modifications au sein d'HETEROFOR pourraient être envisagées. Afin de réaliser les

simulations au sein du modèle, une série d'améliorations du modèle ont dû être réalisées, et sont énumérées dans l'Annexe 10.

Pour aller plus loin, une première amélioration du **module de tempête** pourrait être considérée. En effet, lors d'une tempête, trois dégâts sont possibles : chablis, casse et impact. Une fois qu'un arbre subit l'une de ces dégradations, il est automatiquement enlevé du scénario. Or, en réalité, il arrive qu'un arbre subisse une casse ou un impact, mais réussisse tout de même à reprendre sa croissance. Il pourrait être intéressant de créer de nouvelles formules de croissance, pour les arbres impactés et cassés, leur permettant tout de même de rester dans le peuplement.

Le cycle des plantes pourrait inclure la **régénération depuis la graine**, également. Cela permettrait de prendre en compte les caractéristiques de production, dispersion et germination des différentes espèces. À la suite d'une tempête, les dynamiques de régénération, et la reprise des plants peuvent avoir des réponses différentes d'avant perturbation. Au lieu d'une récurrence dans l'installation des cohortes de régénération, il serait intéressant de respecter l'apparition naturelle des semis.

Comme dit précédemment, le modèle ne considère pas la cavitation liée au **stress hydrique**. Il serait pertinent d'envisager le développement de ce concept, en vue d'identifier les mécanismes de défense et de résistance (ou sensibilité) des différentes espèces.

Une dernière amélioration d'HETEROFOR concerne les **rejets de souche**. Les rejets de souche sont un mode de reproduction suivant la coupe d'un arbre. Le nombre important de tiges, et leur croissance plus rapide, ne correspondent pas aux caractéristiques de la régénération telles qu'initialisées dans HETEROFOR. Il serait intéressant de récolter des données de croissance de rejets de souche, selon les essences, et d'inclure un nouveau module incluant ce type de reproduction, suite à une perturbation telle qu'une coupe, une tempête, un feu, etc.



## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrams, Marc D. 1998. « The Red Maple Paradox ». *BioScience* 48 (5): 355-64. <https://doi.org/10.2307/1313374>.
- Alexander, L, S Allen, N.L. Bindoff, François-Marie Bréon, et et al. 2013. « Climate Change 2013 : The Physical Science Basis – Summary for Policy Makers. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. » [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM\\_Approved27Sep2013.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf).
- Allen, C.D. et et al. 2009. *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forest*. *Forest Ecol. Manage.*
- André, Frédéric, Louis de Wergifosse, François de Coligny, Nicolas Beudez, Gauthier Ligot, Vincent Gauthray-Guyénet, Benoît Courbaud, et Mathieu Jonard. 2021. « Radiative Transfer Modeling in Structurally Complex Stands: Towards a Better Understanding of Parametrization ». *Annals of Forest Science* 78 (4): 1-21. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01106-8>.
- André, Frédéric, Louis de Wergifosse, et Mathieu Jonard. 2019. « Amélioration des itinéraires sylvicoles pour une foresterie durable dans un environnement changeant. » *Forêt Nature*, n° 152: 44-51.
- Baar, François. 2005. « Alternative à la futaie régulière monospécifique ou comment transformer une pessière en peuplement irrégulier mélangé plus proche de la nature ? », 17.
- Bakuzis, Egolfs Voldemars, et Henry L. Hansen. 1965. *Balsam Fir: Abies Balsamea (Linnaeus) Miller; a Monographic Review*. University of Minnesota Press.
- Beaudet, Marilou. 2004. « Modélisation des effets du jardinage de différentes intensités sur les érablières en Estrie. Rapport final de projet CRSNG-industriel présenté à Domtar ».
- Beck, Hylke E., Niklaus E. Zimmermann, Tim R. McVicar, Noemi Vergopolan, Alexis Berg, et Eric F. Wood. 2018. « Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-Km Resolution ». *Scientific Data* 5 (1): 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- Bégin, Jean, Louis Bélanger, Jacques Pfalzgraf, et Marius Pineau. 1990. « Qualité de Station et Production Dans Les Érablières Rouges de La Plaine de Drummondville, Québec ». *The Forestry Chronicle* 66 (4): 377-87. <https://doi.org/10.5558/tfc66377-4>.
- Berteaux, Dominique. 2014. *Changements climatiques et biodiversité du Québec - Vers un nouveau patrimoine naturel*. Presse de l'Université du Québec. Québec.

- Bhaskar, Radika, L. Arreola, Francisco Mora, Angelina Martinez-Yrizar, Miguel Martinez-Ramos, et Patricia Balvanera. 2017. « Response diversity and resilience to extreme events in tropical dry secondary forests ». *Forest Ecology and Management* 426 (novembre). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.028>.
- Blankenship, Robert E. 2014. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. 2<sup>e</sup> éd. John Wiley & Sons.
- Boulet, B. 2003. *Les champignons des arbres de l'est de l'Amérique du Nord*. Québec: Les Publications du Québec.
- Boulet, B. 2007. *Défauts et indices de la carie des arbres*. 2<sup>e</sup> Édition. Québec: Les publications du Québec.
- Brown, J, -L. 1992. « Principes et normes d'aménagement des peuplements naturels de pins blancs et de pins rouges proposés pour le Québec. » Note de rech. for. no 46. Dir. rech. for., Gouv. Québec.
- Bryant, Timothy, Kristen Waring, Andrew Sánchez Meador, et John B. Bradford. 2019. « A Framework for Quantifying Resilience to Forest Disturbance ». *Frontiers in Forests and Global Change* 2. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2019.00056>.
- Buotte, Polly C., Beverly E. Law, William J. Ripple, et Logan T. Berner. 2020. « Carbon Sequestration and Biodiversity Co-Benefits of Preserving Forests in the Western United States ». *Ecological Applications* 30 (2): e02039. <https://doi.org/10.1002/eap.2039>.
- Canham, Charles, Michael Papaik, et Erika Latty. 2001. « Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate species ». *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 31 (janvier): 1-10. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-1-1>.
- Cauboue, M., et D. Malenfant. 1988. *Le reboisement au Québec - Exigences écologiques des épinettes (Picea), des pins (Pinus) et des mélèzes (Larix) plantés au Québec*. Les publications du Québec.
- Cauboue, Madeleine, et Denise-Madeleine Cotte. 2007. *Aire de distribution de l'érable rouge. Description écologique des forêts du Québec*. <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=97949>.
- Chaloux, Annie, Hugo Séguin, et Philippe Simard. 2022. « "All in" climate regime: federated states as autonomous participants to the Paris Agreement the cases of Québec and California ». *Canadian Foreign Policy Journal*, février, 1-20. <https://doi.org/10.1080/11926422.2021.2002702>.

- Chen, I-Ching, Jane K. Hill, Ralf Ohlemüller, David B. Roy, et Chris D. Thomas. 2011. « Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming ». *Science* 333 (6045): 1024-26. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>.
- Colin, Francis, Yves Brunet, Isabelle Vinkler, et Jean-François Dhôte. 2008. « Résistance aux vents forts des peuplements forestiers, et notamment des mélanges d'espèces ». *Revue Forestière Française*, n° 2. <https://doi.org/10.4267/2042/18143>.
- Conseil régional de Franche-Comté. 2000. « Typologie des peuplements feuillus irréguliers de Franche-Comté ». *SFFC*.
- Cordero Montoya. 2021. « Comparaison des patrons de mortalité dans des peuplements aménagés en mode équienne et inéquienne en forêt feuillue ». Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Outaouais.
- Dauzat, Albert, Jean Dubois, et Henri Mitterand. 1971. *Dictionnaire étymologique*. Club France Loisirs. Larousse Thématique. Paris: Librairie Larousse.
- Dietz, Lucie. 2020. « Dynamique spontanée post-tempête de la végétation forestière en contexte de changement climatique ». AgroParisTech.
- Doyon, Frédéric. 2021. « Description sommaire du dispositif Sylvadapt ».
- Drever, Charles R., Garry D. Peterson, Christian Messier, Yves Bergeron, et Mike Flannigan. 2006. « Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? » *Canadian Journal of Forest Research*. [https://www.researchgate.net/publication/32049341\\_Can\\_forest\\_management\\_based\\_on\\_natural\\_disturbances\\_maintain\\_ecological\\_resilience](https://www.researchgate.net/publication/32049341_Can_forest_management_based_on_natural_disturbances_maintain_ecological_resilience).
- Dufour-Kowalski, Samuel, Benoît Courbaud, Philippe Dreyfus, Céline Meredieu, et François de Coligny. 2012. « Capsis: An Open Software Framework and Community for Forest Growth Modelling ». *Annals of Forest Science* 69 (2): 221-33. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>.
- Dufrêne, Marc, et Laura Maebe. 2017. « Les services écosystémiques en forêt ». In *Le grand livre de la forêt*. Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.
- Dumont, M. 1995. *Plantation des feuillus nobles - Guide*. Les publications du Québec. Sainte-Foy.
- Dupont, Sylvain, Pivato David, et Y. Brunet. 2015. « Wind damage propagation in forests ». *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215 (décembre): 243-51. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.07.010>.
- Emberger, Céline, Laurent Larrieu, et Pierre Gonin. 2015. *Diversité des espèces en forêt: Pourquoi et comment l'intégrer dans la gestion ?* CNPF-IDF.

- Engelman, H. M., et R. D. Nyland. 2006. *Interference to Hardwood Regeneration in Northeastern North America: Assessing and Countering Ferns in Northern Hardwood Forests*. North. J. Appl. For. 23.
- Fang, Hongliang, Frédéric Baret, Stephen Plummer, et Gabriela Schaepman-Strub. 2019. « An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications ». *Reviews of Geophysics* 57 (3): 739-99. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>.
- FAO. 2021. *Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 : Rapport principal*. Rome, Italy. <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/ca9825fr>.
- Fei, Songlin, et Kim C. Steiner. 2009. « Rapid Capture of Growing Space by Red Maple ». *Canadian Journal of Forest Research* 39 (8): 1444-52. <https://doi.org/10.1139/X09-065>.
- Forget, Éric, Ronnie Drever, R P Bio, et François Lorenzetti. 2003. « Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises - revue de littérature - », 65.
- Forzieri, Giovanni, Vasilis Dakos, Nate G. McDowell, Alkama Ramdane, et Alessandro Cescatti. 2022. « Emerging Signals of Declining Forest Resilience under Climate Change ». *Nature* 608 (7923): 534-39. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9>.
- Frazer, Gordon W, Charles D Canham, et Pamela Sallaway. 1999. « Gap Light Analyzer (GLA) : Imaging Software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices from True-Colour Fisheye Photographs, Users Manual and Program Documentation. » *Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.*, 40.
- Gardiner, Barry. 2021. « Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests ». *Journal of Forest Research* 26 (4): 248-66. <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1940665>.
- Gazol, Antonio, et J. Julio Camarero. 2016. « Functional Diversity Enhances Silver Fir Growth Resilience to an Extreme Drought ». *Journal of Ecology* 104 (4): 1063-75. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12575>.
- Gelpe, J., et J. Timbal. 1986. *Action du calcaire sur la germination et la croissance du chêne rouge d'Amérique*. Ann. Sc. For. 43 (3).
- Gouvernement du Canada. 2013. « Tordeuse des bourgeons de l'épinette ». Ressources naturelles Canada. 25 octobre 2013. <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets/feux-insectes-perturbations/principaux-insectes-et-maladies-des-forets-au-canada/tordeuse-des-bourgeons-de-lepinette/13384>.
- Gouvernement du Canada. 2021. « Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada en 2021 ». 16 décembre 2021. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement->

climatique/services/dix-evenements-meteorologiques-plus-marquants/2021.html.

Gouvernement du Canada, Environment and Climate Change. 2017. « Climate Model: Second Generation Canadian Earth System Model ». 19 octobre 2017. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/modeling-projections-analysis/centre-modelling-analysis/models/second-generation-earth-system-model.html>.

Gouvernement du Québec. 2014a. « Érable rouge (ERR) ». Publications du Québec - Centre de services partagés du Québec. 2014. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/arbre.php?id=99>.

Gouvernement du Québec. 2014b. « Le guide sylvicole du Québec - Outil de comparaison des essences ». 2014. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/essence.php?e=commerciale>.

Gouvernement du Québec. 2015. « Vitesse et direction des vents. Normales 1981-2010. »

Granda, Elena, Antonio Gazol, et Jesús Julio Camarero. 2018. « Functional Diversity Differently Shapes Growth Resilience to Drought for Co-Existing Pine Species ». *Journal of Vegetation Science* 29 (2): 265-75. <https://doi.org/10.1111/jvs.12617>.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2003. « Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie ». Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

Gu, Lianhong, Paul J. Hanson, W. Mac Post, Dale P. Kaiser, Bai Yang, Ramakrishna Nemani, Stephen G. Pallardy, et Tilden Meyers. 2008. « The 2007 Eastern US Spring Freeze: Increased Cold Damage in a Warming World? » *BioScience* 58 (3): 253-62. <https://doi.org/10.1641/B580311>.

Guay-Picard, Alexandre, Guy Larochelle, Marie-Pier Arsenault, et Amélie Collard. 2015a. « Plan de protection et de mise en valeur des forêts privées du centre-du-Québec. Tome 1 - Portrait du territoire », 159.

Guay-Picard. 2015b. « Plan de protection et de mise en valeur des forêts privées du centre-du-Québec. Tome 2 - Portrait des forêts », 96.

Guignabert, Arthur, Quentin Ponette, Frédéric André, Christian Messier, Philippe Nolet, et Mathieu Jonard. 2023. « Validation of a New Spatially Explicit Process-Based Model (HETEROFOR) to Simulate Structurally and Compositionally Complex Forest Stands in Eastern North America ». *Geoscientific Model Development* 16 (6): 1661-82. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-1661-2023>.

Hernandez-Santana, Virginia, Celia M Rodriguez-Dominguez, Jaime Sebastian-Azcona, Luis Felipe Perez-Romero, et Antonio Diaz-Espejo. 2023. « Role of hydraulic traits

- in stomatal regulation of transpiration under different vapour pressure deficits across five Mediterranean tree crops ». *Journal of Experimental Botany*, avril, erad157. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad157>.
- Hightshoe, G. 1978. *Natives Trees for Urban and Rural America - A Planting Design Manual for Environmental Designers*. Ames, Iowa State University.
- Holling, C S. 1973. « Resilience and Stability of Ecological Systems ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1): 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>.
- Horton, K.W., et G.H.D. Bedell. 1960. *White and red pine - Ecology, Silviculture and Management*. Bull. no 124. Ottawa: Dept. Northern Nat. Res., Forestry Branch.
- Hough, Romeyn B. 2019. *The Woodbook - The complete plates*. Taschen GmbH, Hohenzollernring.
- Houle, Gilles. 1994. « Spatiotemporal Patterns in the Components of Regeneration of Four Sympatric Tree Species -- Acer Rubrum, A. Saccharum, Betula Alleghaniensis and Fagus Grandifolia ». *Journal of Ecology* 82 (1): 39-53. <https://doi.org/10.2307/2261384>.
- Humbert, Lionel, Daniel Gagnon, Daniel Kneeshaw, et Christian Messier. 2007. « A Shade Tolerance Index for Common Understory Species of Northeastern North America ». *Ecological Indicators* 7 (1): 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.12.002>.
- Hutnik, Russell J., et Harry W. Yawney. s. d. « Sylvical characteristics of red maple (acer rubrum) ». Consulté le 14 mars 2022. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/X09-065>.
- Jackson, Tobias, Alexander Shenkin, Bavisha Kalyan, Jessica Zions, Kim Calders, Niall Origo, Mathias Disney, Andrew Burt, Pasi Raumonon, et Yadvinder Malhi. 2019. « A New Architectural Perspective on Wind Damage in a Natural Forest ». *Frontiers in Forests and Global Change* 1. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2018.00013>.
- Jha, Srinidhi, Jew Das, et Manish Kumar Goyal. 2019. « Assessment of Risk and Resilience of Terrestrial Ecosystem Productivity under the Influence of Extreme Climatic Conditions over India ». *Scientific Reports* 9 (1): 18923. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55067-0>.
- Jmp, statistical discover. 2022. « Le test de Student ». 2022. [https://www.jmp.com/fr\\_fr/statistics-knowledge-portal/t-test.html](https://www.jmp.com/fr_fr/statistics-knowledge-portal/t-test.html).
- Jobidon, R. 1995. « Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec - Revue de littérature. » Mémoire de recherche forestière no 117, Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière.

- Jonard, Mathieu, Frédéric André, François de Coligny, Louis de Wergifosse, Nicolas Beudez, Hendrik Davi, Gauthier Ligt, Quentin Ponette, et Caroline Vincke. 2020. « HETEROFOR 1.0: A Spatially Explicit Model for Exploring the Response of Structurally Complex Forests to Uncertain Future Conditions – Part 1: Carbon Fluxes and Tree Dimensional Growth ». *Geoscientific Model Development* 13 (3): 905-35. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-905-2020>.
- Kerr, Richard A. 1989. « Hansen vs. the World on the Greenhouse Threat ». *Science* 244 (4908): 1041-43. <https://doi.org/10.1126/science.244.4908.1041>.
- L. Hartwell, Allen, Jr., Jeff T. Baker, et Ken J. Boote. 1997. « Changements du climat et production agricole. Chapitre 4. L'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>: production et rétention accrues d'hydrates de carbone en termes de rendement en biomasse et en grain ». In , FAO et Polytechnica. <https://www.fao.org/3/w5183f/w5183f06.htm>.
- Laberche, Jean-Claude. 2020. *Biologie végétale 3e éd.* Dunod.
- Le Goff, Héloïse, et Yves Bergeron. 2014. « Évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique au Québec ». *The Forestry Chronicle* 90 (02): 228-43. <https://doi.org/10.5558/tfc2014-041>.
- Ligt, Gauthier, Philippe Balandier, Sophie Schmitz, et Hugues Claessens. 2020. « Transforming Even-Aged Coniferous Stands to Multi-Aged Stands: An Opportunity to Increase Tree Species Diversity? » *Forestry: An International Journal of Forest Research* 93 (5): 616-29. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa004>.
- Ligt, Gauthier, Philippe Balandier, Sophie Schmitz, Sébastien Petit, et Hugues Claessens. 2020. « Contrôler par l'éclaircie la composition de la régénération naturelle dans les peuplements résineux en cours d'irrégularisation ». *Forêt.Nature*, n° 154 (mars). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/246357>.
- Lindner, Marcus, Michael Maroschek, Sigrid Netherer, Antoine Kremer, Anna Barbati, Jordi Garcia-Gonzalo, Rupert Seidl, et al. 2010. « Climate Change Impacts, Adaptive Capacity, and Vulnerability of European Forest Ecosystems ». *Forest Ecology and Management, Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate*, 259 (4): 698-709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
- Lloret, Francisco, Eric G. Keeling, et Anna Sala. 2011. « Components of Tree Resilience: Effects of Successive Low-Growth Episodes in Old Ponderosa Pine Forests ». *Oikos* 120 (12): 1909-20. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>.
- Long, S. P. 1991. « Modification of the Response of Photosynthetic Productivity to Rising Temperature by Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations: Has Its Importance Been Underestimated? » *Plant, Cell & Environment* 14 (8): 729-39. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01439.x>.

- Lupien, P. 2004. *Des feuillus nobles en Basse-Mauricie. Guide de mise en valeur*. Shawinigan: Fonds d'information, de recherche et de développement de la forêt privée mauricienne (FIRDFPM) et Syndicat des producteurs de bois de la Mauricie.
- M. Burns, Russell, et Barbara H. Honkala. 2004. « Silvics Manual Volume 1-Conifers and Volume 2-Hardwoods ». 2004. [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag\\_654/table\\_of\\_contents.htm](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/table_of_contents.htm).
- Marshall, P. 2009. « The Problem of Eastern White Pine (*Pinus strobus* L.) in Southern New England: Ecophysiology, Site Restriction, and Historical Land-Use Change. » *Journal of Sustainable Forestry*, 28, 108-31.
- Martin, Marie-Laure, Roland Susse, Julien Tomasini, Christophe Pichery, Max Bruciamacchie, et Collectif AFI. 2020. « Les apports de la futaie irrégulière sur les différentes fonctions de la forêt. » *Forêt Nature*, n° 156 (septembre): 31-47.
- Mason, W.L. 2002. « Are irregular stands more windfirm? » *Forestry: An International Journal of Forest Research* 75 (4): 347-55. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.4.347>.
- Massenet, Jean-Yves. 2008. « Chapitre V : Caractérisation et mesure des peuplements réguliers ».
- McDowell, Nate, William T. Pockman, Craig D. Allen, David D. Breshears, Neil Cobb, Thomas Kolb, Jennifer Plaut, et al. 2008. « Mechanisms of Plant Survival and Mortality during Drought: Why Do Some Plants Survive While Others Succumb to Drought? » *New Phytologist* 178 (4): 719-39. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>.
- McKenney, Daniel, JOHN PEDLAR, KEVIN LAWRENCE, KATHY CAMPBELL, et M.F. Hutchinson. 2007. « Potential Impacts of Climate Change on the Distribution of North American Trees ». *BioScience* 57 (décembre): 939-48. <https://doi.org/10.1641/B571106>.
- McManus, Kelly M., Douglas C. Morton, Jeffrey G. Masek, Dongdong Wang, Joseph O. Sexton, Jyoteshwar R. Nagol, Pascale Ropars, et Stéphane Boudreau. 2012. « Satellite-Based Evidence for Shrub and Graminoid Tundra Expansion in Northern Quebec from 1986 to 2010 ». *Global Change Biology* 18 (7): 2313-23. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02708.x>.
- Meredieu, Céline, Y. Brunet, Frédéric Danjon, Pauline Défossez, Sylvain Dupont, Kana Kamimura, et Barry Gardiner. 2014. « Outils de simulation et d'évaluation des risques tempêtes pour les forêts : les progrès acquis dans les différentes disciplines ». *Innovations agronomiques ((ISSN 1958-5853))* 41 (décembre): 43-56.
- Merlet, Philippe, et Anémone Berès. 2003. *Le petit Larousse*. Le Petit Larousse. Larousse/VUEF.

- Messier, Christian, Jürgen Bauhus, Frederik Doyon, Fanny Maure, Rita Sousa-Silva, Philippe Nolet, Marco Mina, Núria Aquilué, Marie-Josée Fortin, et Klaus Puettmann. 2019. « The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes ». *Forest Ecosystems* 6 (1): 21. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>.
- Messier, Christian, Jürgen Bauhus, Rita Sousa-Silva, Harald Auge, Lander Baeten, Nadia Barsoum, Helge Bruelheide, et al. 2021. « For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! » *Conservation Letters* 15 (juillet). <https://doi.org/10.1111/conl.12829>.
- Messier, Christian, René Doucet, Jean-Claude Ruel, Yves Claveau, Colin Kelly, et Martin J Lechowicz. 1999. « Functional Ecology of Advance Regeneration in Relation to Light in Boreal Forests ». *Canadian Journal of Forest Research* 29 (6): 812-23. <https://doi.org/10.1139/x99-070>.
- Messier, Christian, Catherine Potvin, Bart Muys, Pedro Brancalion, Robin Chazdon, Rupert Seidl, et Jürgen Bauhus. 2022. « Warning: Natural and Managed Forests are Losing their Capacity to Mitigate Climate Change ». *Forestry Chronicle* 98 (novembre): 2-5. <https://doi.org/10.5558/tfc2022-007>.
- Mina, Marco, Christian Messier, Matthew Duveneck, Marie-Josée Fortin, et Núria Aquilué. 2022. « Managing for the unexpected: Building resilient forest landscapes to cope with global change ». *Global Change Biology* 28 (avril): 4323-41. <https://doi.org/10.1111/gcb.16197>.
- Ministère de la transition écologique de France. 2021. « Scénarios et projections climatiques ». Chiffres clés du climat. 2021. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/3-scenarios-et-projections-climatiques.php>.
- Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse. 2019. « Données quantitatives sur l'importance planétaire de la photosynthèse ». [https://eduscol.education.fr/document/25408/download#:~:text=La%20production%20primaire%20nette%20\(PPN,h%2C%20jour%2C%20ann%C3%A9e\)](https://eduscol.education.fr/document/25408/download#:~:text=La%20production%20primaire%20nette%20(PPN,h%2C%20jour%2C%20ann%C3%A9e)).
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. 2023. « MFFP: Inventaire écoforestier ». Réseaux des placettes-échantillons permanentes du Québec. <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/inventaire-ecoforestier/>.
- Ministère des Ressources Naturelles, Catherine Larouche, François Guillemette, Patricia Raymond, et Jean-Pierre Saucier. 2013a. *Le Guide sylvicole du Québec - Tome I : Les concepts et l'application de la sylviculture*. Publications du Québec. Québec.
- Ministère des Ressources Naturelles, Catherine Larouche, François Guillemette, Patricia Raymond, et Jean-Pierre Saucier. 2013b. *Le Guide sylvicole du Québec - Tome II : Les concepts et l'application de la sylviculture (French Edition)*. Publications du Québec. Québec.

<https://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/cspq/fr/Catalogue/Environnement-et-ressources-naturelles/978-2-551-25218-3/p/978-2-551-25218-3>.

Musy, André, et Christophe Higy. 2004. *Hydrologie: Une science de la nature*. PPUR presses polytechniques.

Niinemets, Ülo, et Fernando Valladares. 2006. « Tolerance to Shade, Drought, and Waterlogging of Temperate Northern Hemisphere Trees and Shrubs ». *Ecological Monographs* 76 (4): 521-47. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2).

Nikinmaa, Laura. 2022. « Enhancing the resilience of European forests - from concept to management application ».

Oliver, Tom H., Matthew S. Heard, Nick J. B. Isaac, David B. Roy, Deborah Procter, Felix Eigenbrod, Rob Freckleton, et al. 2015. « Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions ». *Trends in Ecology & Evolution* 30 (11): 673-84. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009>.

OMNR. 1997. *Silvicultural guide to managing for black spruce, jack pine and aspen on boreal forest ecosites in Ontario*. Ont. Min. Nat. Resour., Queen's Printer for Ontario. Vol. Version 1.1. Toronto: Queen's Printer for Ontario.

OMNR. 1998. *A Silvicultural Guide for the Great Lakes-St. Lawrence Conifer Forest in Ontario*. Ont. Min. Nat. Resour., Queen's Printer for Ontario. Vol. Version 1.1. Toronto.

OMNR. 2000. *A Silviculture Guide to Managing Southern Ontario Forests*. Technical series. Ontario: Forest Analyst, Southcentral Sciences Section, OMNR.

OMNR. 2003. *Silviculture Guide to Managing Spruce, Fir, Birch, and Aspen Mixedwoods in Ontario's Boreal Forest*. Vol. Version 1.0. Ontario: Ont. Min. Nat. Resour., Queen's Printer for Ontario.

Origo, Niall, Kim Calders, Joanne Nightingale, et Mathias Disney. 2017. « Influence of Levelling Technique on the Retrieval of Canopy Structural Parameters from Digital Hemispherical Photography ». *Agricultural and Forest Meteorology* 237-238 (mai): 143-49. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.004>.

Ouedraogo, Wendsom Osée, Alain P. K. Gomgnimbou, Saïdou Santi, Daniel Ilboudo, et Aboubacar Toguyeni. 2019. « Quantification de la Biomasse et stockage du carbone du massif forestier de l'École Nationale des Eaux et Forêts de Dindéresso province du Houet au Burkina Faso ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. <http://www.ifgdg.org>.

Ouranos. 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal, Qc. [http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53\\_sccc\\_21\\_06\\_lr.pdf](http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53_sccc_21_06_lr.pdf).

- Pachauri, R. K, Leo A Meyer, et Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. 2015. *Changements climatiques 2014: rapport de synthèse*.
- Pan, Yude, Kevin McCullough, et David Y. Hollinger. 2018. « Forest Biodiversity, Relationships to Structural and Functional Attributes, and Stability in New England Forests ». *Forest Ecosystems* 5 (1): 14. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0132-4>.
- Pardos, Marta, Miren Rio, H Pretzsch, Hervé Jactel, Kamil Bielak, Felipe Bravo, Gediminas Brazaitis, et al. 2021. « The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe ». *Forest Ecology and Management* 481 (février): 118687. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>.
- Pellegrin, G. 1998. *Répertoire des arbres et arbustes ornementaux*. 2e éd. Hydro-Québec.
- Peltola, Heli, Barry Gardiner, Seppo Kellomäki, Taneli Kolström, Reinhard Lässig, John Moore, Christopher Quine, et Jean-Claude Ruel. 2000. « Wind and other abiotic risks to forests - Introduction ». *Forest Ecology and Management - FOREST ECOL MANAGE* 135 (septembre): 1-2. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00293-0).
- Périé, Catherine, éd. 2014. *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec*. Mémoire de recherche forestière 173. Québec: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière.
- Perkey, A. W., et B. L. Wilkins. 2001. *Crop Tree Field Guide - Selecting and Managing Crop Trees in the Central Appalachians*. USDA For. Serv., Northeastern Area, State and Private Forestry, Morgantown.
- Peterson, Chris J. 2000. « Catastrophic Wind Damage to North American Forests and the Potential Impact of Climate Change ». *Science of The Total Environment, Climate change, Forests and*, 262 (3): 287-311. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00529-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00529-5).
- Phares, R.E. 1971. *Growth of Red Oak (Quercus Rubra L.) Seedlings in Relation to Light and Nutrients*. *Ecology*, 52.
- Place, I.C.M. 1952. « The influence of bracken fern establishment of spruce and fir seedlings ». Sylvicultural Leaflet no 70. Ottawa: Division of Forest Research, Forestry Branch, Department of Resources and Development.
- Ponette, Quentin. 2021. « Effects of mixed-species forest stands on ecosystem processes ». UCLouvain, Louvain-la-Neuve.
- Potterf, Maria, Kyle Eyvindson, Clemens Blattert, Daniel Burgas, Ryan Burner, Jörg Stephan, et Mikko Monkkonen. 2022. « Interpreting wind damage risk-how multifunctional forest management impacts standing timber at risk of wind

- elling ». *European Journal of Forest Research* 141 (avril).  
<https://doi.org/10.1007/s10342-022-01442-y>.
- Price, D T, D W McKenney, L A Joyce, R M Siltanen, P Papadopol, et K Lawrence. 2011. « High-Resolution Interpolation of Climate Scenarios for Canada Derived from General Circulation Model Simulations », 126.
- Raymond, Patricia, Catherine Larouche, Steve Bédard, et Serge Tremblay. 2013. « Chapitre 20 - La coupe progressive irrégulière. » In *MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 - Les concepts et l'application de la sylviculture, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier*, Les publications du Québec, 456-515.
- Reed, David D., Elizabeth A. Jones, Hal O. Liechty, Glenn D. Mroz, et Martin F. Jurgensen. 1992. « Impacts of Annual Weather Conditions on Forest Productivity ». *International Journal of Biometeorology* 36 (1): 51-57.  
<https://doi.org/10.1007/BF01208735>.
- Reyer, Christopher P. O., Niels Brouwers, Anja Rammig, Barry W. Brook, Jackie Epila, Robert F. Grant, Milena Holmgren, et al. 2015. « Forest Resilience and Tipping Points at Different Spatio-Temporal Scales: Approaches and Challenges ». *Journal of Ecology* 103 (1): 5-15. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12337>.
- Richard P. Allan, Paola A. Arias, Sophie Berger, Josep G. Canadell, Christophe Cassou, Deliang Chen, Annalisa Cherchi, et al. 2021. « Climate Change 2021. The Physical Science Basis. »
- Rondeux, Jacques. 1995. « La surface terrière d'un peuplement ». Gestion et Economie forestières, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux.
- S. Walters, Russell, et Harry W. Yawney. 1990. « Acer rubrum L ». 1990.  
[https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag\\_654/volume\\_2/acer/rubrum.htm](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/acer/rubrum.htm).
- Sala, Osvaldo E., F. Stuart Chapin, III, Juan J. Armesto, Eric Berlow, Janine Bloomfield, Rodolfo Dirzo, et al. 2000. « Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100 ». *Science* 287 (5459): 1770-74. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>.
- Sardin, Thierry, Jérôme Bock, et Jacques Becquey. 2008. « Les peuplements mélangés : enjeux et interrogations des gestionnaires ». *Revue Forestière Française*, n° 2.  
<https://doi.org/10.4267/2042/18133>.
- Scheffer, M. 2009. « Transitions critiques dans la nature et la société ». *Princeton University Press, Princeton, États-Unis*.
- Schuck, Andreas, et Mart-Jan Schelhaas. 2013. « Storm damage in Europe - A overview ». In , 3:15-23.

- Schuler, Thomas M. 2004. « Fifty years of partial harvesting in a mixed mesophytic forest: Composition and productivity ». *Canadian Journal of Forest Research*, n° 34(5): 985-97.
- Spittlehouse, D., et Robert Stewart. 2003. « Adaptation to climate change in forest management ». *British Columbia Journal of Ecosystems and Management* 4 (janvier). <https://doi.org/10.22230/jem.2004v4n1a254>.
- Steil, Jeremy C., Charles R. Blinn, et Randy Kolka. 2009. « Foresters' Perceptions of Windthrow Dynamics in Northern Minnesota Riparian Management Zones ». *Northern Journal of Applied Forestry*. 26(2): 76-82. 26 (2): 76-82.
- Strong, Terry F., Audra E. Hubbell, Adam H. Weise, et Gayne G. Erdmann. 2006. « Effects of Crown Release on Growth and Quality of Even-Aged Red Maple Stands ». <https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/9168>.
- Sutton, R. F. 1969. *Silvics of white spruce [Picea glauca (Moench) Voss]*. Publ. no 1250. Dept. Fisheries and forestry, Ottawa.
- Thompson, I. 2011. « Biodiversity, Ecosystem Thresholds, Resilience and Forest Degradation » 62: 6.
- Timbal, J., A. Kremer, N. Le Goff, et G. Nepveu. 1994. *Le chêne rouge d'Amérique*. INRA.
- topographic-map.com. 2022. « Carte topographique Québec, altitude, relief ». Cartes topographiques. 2022. <https://fr-fr.topographic-map.com/map-2tp/Qu%C3%A9bec/?center=45.9877%2C-72.61615&zoom=16&popup=45.98559%2C-72.61710>.
- Truax, Benoit. 2021. « Effet de l'ouverture du couvert forestier après 5 ans sur la croissance de chênes rouges reboisés par enrichissement de forêts dégradées du Centre-du-Québec ». Victoriaville: Agence forestière des Bois-Francs. <https://afsq.org/information-foret/nos-arbres/sapin-baumier/>.
- U. S. Department of Agriculture. 2008. « Conservation plant characteristics for scientific name (common name): plants ». 2008. <http://www.fs.fed.us/database/feis/plants/tree/>.
- Université de Liège. s. d. « Biostat : Corrélation de Pearson ». Consulté le 29 novembre 2022. [http://www.biostat.ulg.ac.be/pages/Site\\_r/corr\\_pearson.html](http://www.biostat.ulg.ac.be/pages/Site_r/corr_pearson.html).
- US Department of Commerce, NOAA. 2022. « Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases ». 2022. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
- US Department of Commerce. s. d. « The Enhanced Fujita Scale (EF Scale) ». NOAA's National Weather Service. Consulté le 16 novembre 2022. <https://www.weather.gov/oun/efscale>.

- Vuuren, Detlef P. van, Jae Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, Allison Thomson, Kathy Hibbard, George C. Hurtt, et al. 2011. « The Representative Concentration Pathways: An Overview ». *Climatic Change* 109 (1): 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- de Wergifosse, Louis. 2021. « Simulating tree growth response to climate change in structurally-complex oak and beech stands across Europe ». UCL - Université Catholique de Louvain. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:250188>.
- de Wergifosse, Louis, Frédéric André, Nicolas Beudez, François de Coligny, Hugues Goose, François Jonard, Quentin Ponette, Hugues Titeux, Caroline Vincke, et Mathieu Jonard. 2020. « HETEROFOR 1.0: A Spatially Explicit Model for Exploring the Response of Structurally Complex Forests to Uncertain Future Conditions – Part 2: Phenology and Water Cycle ». *Geoscientific Model Development* 13 (3): 1459-98. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1459-2020>.
- World Meteorological Organization (WMO), Scientific and Cultural Organization (UNESCO) United Nations Educational, (UNEP) United Nations Environment Programme, (ICSU) International Council for Science, et World Meteorological Organization (WMO). 2011. *GCOS, 154. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate Supplemental details to the satellite-based component of the Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC : 2011 update*. Geneva: WMO.
- Yi, Chuixiang, et Nathan Jackson. 2021. « A Review of Measuring Ecosystem Resilience to Disturbance ». *Environmental Research Letters* 16 (5): 053008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdf09>.
- Zhang, Yun, Yves Bergeron, Xiu-Hai Zhao, et Igor Drobyshev. 2015. « Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada ». *Journal of Plant Ecology* 8 (4): 368-79. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtu029>.
- Zhao, Meng, Geruo Aa, Yanlan Liu, et Alexandra Konings. 2022. « Evapotranspiration frequently increases during droughts ». *Nature Climate Change* 12 (octobre): 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01505-3>.

## 8. ANNEXES

### ANNEXE 1 : AIRE DE DISTRIBUTION NATURELLE DE L'ÉRABLE ROUGE (MADELEINE CAUBOUÉ ET COTTE 2007)



## ANNEXE 2 : FICHES DESCRIPTIVES DES ESSENCES ACCOMPAGNATRICES DE L'ÉRABLIÈRE ROUGE.

### **Bouleau à papier (*Betula papyrifera* var. *papyrifera*)**

#### **Habitat et aire de distribution naturelle**

La distribution naturelle du bouleau à papier s'étend sur la majorité du territoire canadien, et donc sur tous les domaines bioclimatiques du Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007).



Source : Cauboue and Cotte (2007)

#### **Dynamique forestière**

*Betula papyrifera* var. *papyrifera* est souvent géré en peuplement mélangé, mais il est possible de le rencontrer en peuplement pur, après une perturbation (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2000). Son âge d'exploitation varie entre 50 ans en faible qualité de station, et 100 ans lorsque l'espèce est bien installée (Gouvernement du Québec 2014b). Sa croissance est optimale sur des sols à texture fine à moyenne, accompagnée d'un drainage modéré (Gouvernement du Québec, 2014). L'espèce est considérée comme très intolérante à l'ombrage, peu importe le stade de croissance (Bakuzis et Hansen 1965; Gouvernement du Québec 2014b). Bien que l'espèce fasse preuve d'un petit temps de survie, en position intermédiaire, elle finira par mourir (M. Burns et H. Honkala 2004).

#### **Régénération naturelle et croissance**

Le bouleau à papier se régénère de façon sexuée et produit ses semences de façon cyclique ou suite à un feu (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 1998). Tout comme l'érable rouge, sa régénération sera stimulée par un feu, bien que les rejets de bouleau

blanc sont rares (Jobidon 1995; M. Burns et H. Honkala 2004). Comme l'essence est intolérante à l'ombrage, les semis ont besoin de plus de 65% du plein ensoleillement, et ils ont également des besoins modérés en eau et nutriments (Bakuzis et Hansen 1965; OMNR 1997).

### **Facteurs de stress et résilience**

Que ce soit le vent, le gel, la sécheresse, les inondations, le feu ou autres facteurs de stress biotiques et abiotiques, des impacts majeurs peuvent être observés sur le bouleau à papier, car il n'a une résistance que faible à modérée à ces différents facteurs (Boulet 2007; Hightshoe 1978; Jobidon 1995; M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 1998; Pellegrin 1998; Steil, Blinn, et Kolka 2009).

## **Chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*)**

### **Habitat et aire de distribution naturelle**

Il occupe une majeure partie de l'est des USA, et n'est que très peu représenté naturellement au Canada, majoritairement au sud du Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007).



Source : Cauboue and Cotte (2007)

### **Dynamique forestière**

Bien que souvent en peuplement pur dans des conditions d'ensoleillement spécifiques, le chêne rouge peut être retrouvé en mélange avec d'autres feuillus ou résineux (M. Burns et H. Honkala 2004). Son terme d'exploitabilité est atteint aux alentours de 85 à 95 ans, selon la qualité du site (Gouvernement du Québec 2014b). Les besoins en éléments nutritifs du chêne rouge d'Amérique sont modérés (OMNR 1997). La profondeur et la texture de l'horizon A du sol sont les facteurs déterminants d'une croissance optimale de l'essence (M. Burns et H. Honkala 2004). Ainsi, un sol profond de texture loameuse à loam limoneuse, avec un drainage rapide ou modéré est idéal pour le chêne rouge d'Amérique (M. Burns et H. Honkala 2004; Perkey et Wilkins 2001; U. S. Department of Agriculture 2008). À l'inverse, un sol calcaire induit une croissance et un développement racinaire faibles, et conduit donc à une mortalité élevée des individus (Gelpe et Timbal 1986). Le chêne rouge est défini comme intolérant à l'ombrage, lorsqu'il est au stade de semis, et semi-tolérant dans ses stades plus avancés (Timbal et al. 1994; U. S. Department of Agriculture 2008).

### **Régénération naturelle et croissance**

La reproduction du chêne rouge dépend des évènements, car elle se fera de manière sexuée (de façon cyclique) sans perturbation du couvert, et de manière végétative (rejets) suite à une perturbation telle qu'un feu ou une coupe (M. Burns et H. Honkala 2004; Perkey et Wilkins 2001; OMNR 1998). La croissance et la survie des semis dépendent principalement de la lumière (Phares 1971). À l'inverse, les semis sont peu exigeants en éléments nutritifs (Lupien 2004).

### **Facteurs de stress et résilience**

Le chêne rouge est tolérant face aux sécheresses et au vent. À l'inverse, il est assez vulnérable aux inondations (OMNR 2000). Bien qu'il subisse d'importants dégâts lors d'un feu, sa régénération en sera stimulée sous forme de rejets (M. Burns et H. Honkala 2004; Gouvernement du Québec 2014b). En termes d'attaques biotiques, le chêne rouge est victime d'épidémies de spongieuses (*Lymantria dispar*), de tordeuses printanières (*Croesia simipurpurea*), d'arpenteuses d'automne (*Alsophila pometaria*) et de livrées des forêts (*M. disstria*), provoquant des dégâts et mortalités aux individus de l'espèce (Allen et al. 2009; Dumont 1995; OMNR 2000). Les arbres dominés sont, finalement, les plus sensibles aux maladies et champignons, tels que le pourridié-agaric (*Armillaria ssp.* ; Boulet, 2003).

## **Épinette blanche (*Picea glauca*)**

### **Habitat et aire de distribution naturelle**

L'aire de distribution de l'épinette blanche s'étend sur la presque totalité du Canada, et mord légèrement sur les États-Unis. Elle occupe donc tous les domaines bioclimatiques du Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007).



Source : Cauboue and Cotte (2007)

### **Dynamique forestière**

L'espèce est principalement en mélange, mais il est possible de la voir, plus rarement, en peuplements purs (Sutton 1969; M. Cauboue et Malenfant 1988). Son âge d'exploitabilité est très varié, selon le site et la gestion. En plantation, il sera récolté entre 45 et 65 ans, alors qu'en situation naturelle, sa récolte se fera entre 30 et 115 ans (Gouvernement du Québec 2014b). Face à l'ombrage, l'épinette blanche est relativement tolérante au début de sa croissance, mais devient semi-tolérante avec l'âge (Bakuzis et Hansen 1965; M. Burns et H. Honkala 2004). L'essence a de grands besoins en éléments nutritifs (Gouvernement du Québec 2014b). Sa croissance est optimale sur des sols fertiles à texture fine, et avec un drainage bon à modéré (Madeleine Cauboue et Cotte 2007; M. Cauboue et Malenfant 1988).

### **Régénération naturelle et croissance**

La reproduction de l'épinette blanche se fait de manière sexuée, mais elle peut avoir une reproduction végétative par marcottage, de façon rare (Madeleine Cauboue et Cotte 2007). La survie des semis n'est assurée qu'en présence de beaucoup d'eau, d'éléments nutritifs et avec un ensoleillement supérieur à 15% (M. Burns et H. Honkala 2004; Gouvernement du Québec 2014b). La régénération de l'espèce est également

sensible aux différents autres facteurs environnementaux. Que ce soit au stade de semis ou de gaule, l'espèce a une sensibilité élevée à la compétition, due à sa croissance lente (Sutton 1969; M. Burns et H. Honkala 2004).

### **Facteurs de stress et résilience**

Bien que l'épinette blanche soit victime de plusieurs insectes, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*C. fumiferana*) cause actuellement le plus de dégâts à l'espèce, au Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007; Gouvernement du Canada 2013; Pellegrin 1998). L'une des plus importantes maladies touchant l'épinette blanche est la carie du pied et des racines (*O. tomentosa*). Elle peut causer de gros dégâts, notamment des chablis, si les arbres sont établis sur un site sec et sablonneux (Boulet 2003). La résistance de l'épinette blanche au vent est faible à modérée, tout comme sa résistance aux sécheresses et aux inondations (Sutton 1969; OMNR 1997). Elle est très sensible au feu, mais résiste relativement bien aux autres aléas environnementaux (OMNR 2003; Gouvernement du Québec 2014b).

## **Pin blanc (Pinus strobus)**

### **Habitat et aire de distribution naturelle**

Le pin blanc n'est présent naturellement que sur l'est des États-Unis, et une partie du Canada de l'est.



Source : Cauboue and Cotte (2007)

### **Dynamique forestière**

Le pin blanc peut être visible en peuplement pur, avec une prolifération suite à un feu (Marshall 2009). Il peut également être mélangé à des feuillus intolérants sur sols secs, ou avec une faible gamme de résineux et autres feuillus (M. Burns et H. Honkala 2004; Brown 1992). Son âge d'exploitabilité varie entre 65 et 105 ans, selon la qualité de la station (Gouvernement du Québec 2014b). Sa croissance est optimale sur des sols sableux ou pierreux, avec drainage bon à modéré (OMNR 1998; 2000; Madeleine Cauboue et Cotte 2007). Le pin blanc est semi-tolérant à l'ombre et est d'ailleurs considéré comme le plus tolérant des pins indigènes (Madeleine Cauboue et Cotte 2007; M. Cauboue et Malenfant 1988; Lupien 2004; M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2003). Il convient, tout de même, de noter que sa tolérance varie en fonction du sol sur lequel il se trouve (Marshall 2009).

### **Régénération naturelle et croissance**

La reproduction du pin blanc se fait de manière sexuée (Madeleine Cauboue et Cotte 2007). La régénération a un besoin modéré en eau et en éléments nutritifs (Bakuzis et Hansen 1965; Madeleine Cauboue et Cotte 2007). Bien que les semis de l'espèce ont la capacité de survivre, avec une croissance très faible, sous 7% du plein ensoleillement, il leur en faut 20 à 25% minimum pour grandir, et 50% au minimum pour avoir une croissance maximale (Horton et Bedell 1960; M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2000).

Au stade de semis, le pin blanc est très sensible à la compétition, dû à sa croissance lente (M. Burns et H. Honkala 2004).

### **Facteurs de stress et résilience**

Le pin blanc a une résistance modérée à élevée au vent, selon le site sur lequel il se trouve (Horton et Bedell 1960). L'essence a une tolérance élevée à la sécheresse et modérée à élevée au gel (M. Burns et H. Honkala 2004; Gouvernement du Québec 2014b). Elle est, cependant, vulnérable aux inondations (Gouvernement du Québec 2014b).

## **Peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*)**

### **Habitat et aire de distribution naturelle**

Le peuplier faux-tremble a une aire de distribution naturelle proche de celle du bouleau à papier, car tous deux s'étendent sur la presque intégralité du Canada. Une partie de celle-ci est également distribuée sur les États-Unis. Il occupe tous les domaines bioclimatiques du Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007).



Source : Cauboue and Cotte (2007)

### **Dynamique forestière**

Le peuplier faux-tremble se retrouve autant en mélange qu'en peuplement pur (M. Burns et H. Honkala 2004; Madeleine Cauboue et Cotte 2007). Son âge d'exploitabilité varie entre 40 et 90 ans, selon la qualité du site sur lequel il est établi (Gouvernement du Québec 2014b). Ses conditions optimales sont sur un sol très fertile, et il appréciera donc les sols calcaires ou argileux avec un bon drainage (Madeleine Cauboue et Cotte 2007; Lupien 2004; M. Burns et H. Honkala 2004). Il est très intolérant à l'ombrage, et ce, peu importe son stade de croissance (M. Burns et H. Honkala 2004; Gouvernement du Québec 2014b).

### **Régénération naturelle et croissance**

Le peuplier faux-tremble témoigne d'une régénération végétative abondante (M. Burns et H. Honkala 2004; Madeleine Cauboue et Cotte 2007). Il peut se régénérer de façon sexuée, mais cela se produit plus rarement (Gouvernement du Québec 2014b). La régénération du peuplier faux-tremble a un fort besoin en eau et en éléments nutritifs et préfère donc les milieux riches, constamment frais à humides (M. Burns et H. Honkala

2004; Madeleine Cauboue et Cotte 2007; OMNR 2003). Les semis sont également fragiles face aux stress environnementaux (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2003). Étant très sensible à la compétition, le peuplier faux-tremble ne supporte pas la présence de couvert, et a donc besoin d'un plein ensoleillement (M. Burns et H. Honkala 2004; OMNR 2000).

### **Facteurs de stress et résilience**

Les insectes élevant le plus d'attaques sur les peupliers faux-tremble sont les livrées (*M. disstria*), tordeuses (*C. conflictana*), arpeuteuses (*O. bruceata*) et mineuses (*P. populiella* ; Gouvernement du Québec, 2014). La rouille des feuilles (*Melampsora sp.*) est, quant à elle, la maladie la plus importante du peuplier faux-tremble (Gouvernement du Québec 2014b). Sa résistance au vent est modérée. Il a une sensibilité modérée à forte aux autres types de facteurs environnementaux, à l'exception du verglas, la glace et la neige, où il montre une forte résistance (M. Burns et H. Honkala 2004).

## **Sapin baumier (*Abies balsamea*)**

### **Habitat et aire de distribution naturelle**

Le sapin baumier a une aire de distribution se limitant au centre et à l'est du Canada, ainsi qu'une légère partie du nord-est des États-Unis. Elle est, cependant, représentée sur tous les domaines bioclimatiques du Québec (Madeleine Cauboue et Cotte 2007).



Source : Cauboue and Cotte (2007)

### **Dynamique forestière**

L'espèce est rencontrée en peuplement pur ou en mélange, et est souvent accompagnée de mélèze, frêne noir et thuya (M. Burns et H. Honkala 2004; Hough 2019). Son âge d'exploitabilité est atteint entre 35 et 110 ans, selon son caractère en station ou non (Gouvernement du Québec 2014b). Sa croissance est fortement reliée à l'humidité du sol, et sera donc optimale sur un sol à drainage modéré et oblique (M. Burns et H. Honkala 2004; Gouvernement du Québec 2014b). Le sapin baumier est tolérant à l'ombrage au stade de semis, et devient très tolérant en futaie (M. Burns et H. Honkala 2004; Bakuzis et Hansen 1965).

### **Régénération naturelle et croissance**

Le sapin baumier se reproduit de façon sexuée (Madeleine Cauboue et Cotte 2007). Les besoins en eau et en éléments nutritifs du sapin baumier au stade de régénération sont modérés, et sa sensibilité est élevée face aux différents stress environnementaux (M. Burns et H. Honkala 2004). L'espèce a besoin de plus de 10% du plein ensoleillement pour survivre et a une sensibilité faible à modérée à la concurrence (M. Burns et H. Honkala

2004). Il peut, cependant être dominé durant de longues périodes par des feuillus intolérants (érables, peupliers ; Engelman & Nyland, 2006; M. Burns & H. Honkala, 2004).

### **Facteurs de stress et résilience**

La sensibilité au vent du sapin baumier dépend de son âge, et de sa qualité d'ancrage (Gouvernement du Québec 2014b). Les sapins en croissance y résistent bien, à moins d'être constamment exposés. Les peuplements matures se trouvant dans des stations riches et/ou profondes résistent également bien au vent, mais ce n'est plus le cas dans d'autres conditions (M. Burns et H. Honkala 2004; Bakuzis et Hansen 1965). Le sapin baumier résiste de façon modérée au verglas et à la neige, et de façon élevée au gel (M. Burns et H. Honkala 2004; Bakuzis et Hansen 1965). À l'inverse, il a une tolérance faible à la sécheresse, aux inondations, au feu et à la compaction du sol (OMNR 1997).

### ANNEXE 3 : QUELQUES LÉGISLATIONS AU CANADA ET AU QUÉBEC

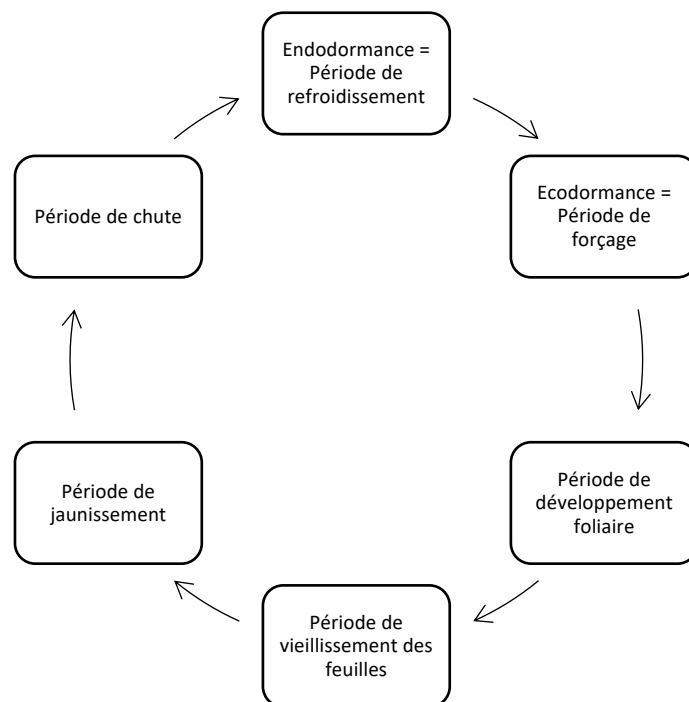
En 2012 était lancée une stratégie d'adaptation et de minimisation des changements climatiques, au Québec, mais celle-ci a été rejetée en 2020. Elle avait pris place suite à un plan d'action pour les années 2006 à 2012, qui incluait une section sur l'aménagement forestier, face aux changements climatiques (Le Goff et Bergeron 2014). Toujours lors de l'année 2012, sortait la loi sur l'aménagement du territoire durable forestier, indiquant qu'il était nécessaire de prendre en compte les changements climatiques dans la gestion des ressources forestières (Le Goff et Bergeron 2014). En 2015 se tenait l'Accord de Paris sur le changement climatique, appelant les partenaires à une série de dispositions obligatoires et non-obligatoires pour limiter le réchauffement global à 1,5 °C (Chaloux, Séguin, et Simard 2022). Le Québec s'est ratifié à cet Accord, en 2016 et semble, dans ce contexte, avoir commencé à mettre en place des législations et des projets sur le terrain (Chaloux, Séguin, et Simard 2022).

Aujourd'hui, un nouveau plan national d'adaptation est en cours, dans la province : le PEV2030 (Chaloux, Séguin, et Simard 2022). Le PV2030 permet au Québec de travailler sur le développement de nouvelles stratégies et de nouveaux outils d'adaptation liés aux changements climatiques et à la vulnérabilité des communautés (Chaloux, Séguin, et Simard 2022). L'un des objectifs de ce plan d'action est la conservation et l'amélioration des puits et réservoirs de carbone. Pour cela, des actions de plantation et de reboisement sont lancées, dans les forêts du Québec, afin d'augmenter leur potentiel de séquestration du carbone (Chaloux, Séguin, et Simard 2022).

Concernant la migration assistée d'espèces, le Québec n'a pas encore sorti d'autorisations ou de législations. Cependant, les gouvernements de la Colombie-Britannique et de l'Alberta, autres provinces du Canada, acceptent le déplacement de 200 mètres en altitude des graines de la plupart des espèces d'arbres, et de deux degrés plus au nord, pour l'Alberta (Berteaux 2014). Au Québec, des plantations d'espèces du sud sont installées plus au nord, et des mélanges de conifères sont mis en place, pour augmenter la résilience forestière (Berteaux 2014).

**ANNEXE 4 : ÉTAPES PHENOLOGIQUES DE LA BIOMASSE FOLIAIRE DANS HETEROFOR**

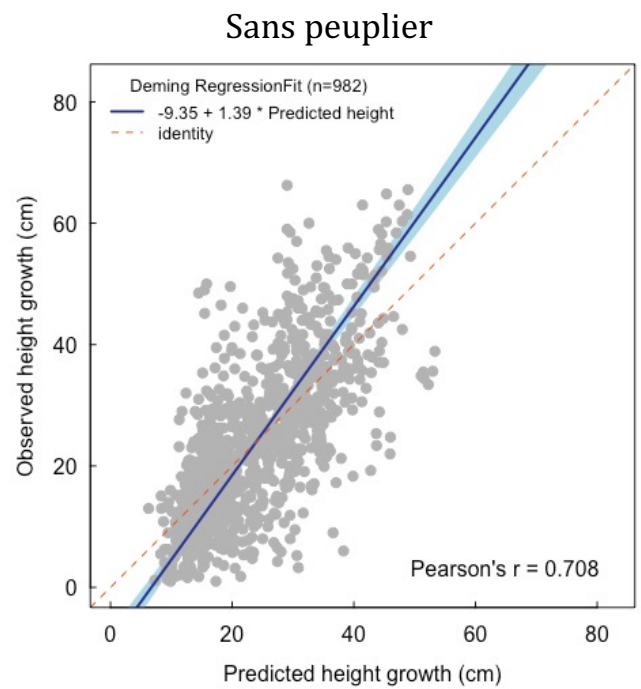
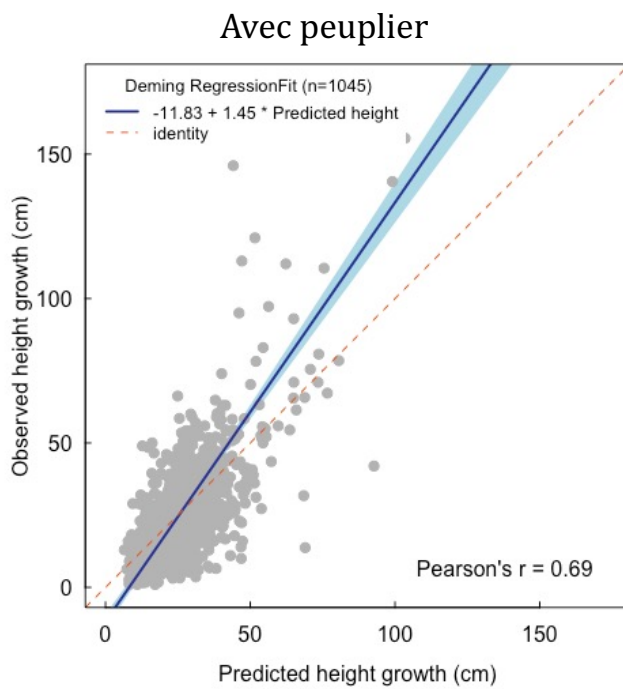
Étapes phénologiques composant les stades d'évolution de la biomasse foliaire dans HETEROFOR. La période de refroidissement, ou d'endodormance, constitue la première étape, initiée par la rupture de la période de dormance des bourgeons. La période de dormance définit la phase de l'année durant laquelle la plante arrête toute activité de croissance, majoritairement engendrée par le raccourcissement des jours et donc de la photopériode, et prenant fin suite à leur allongement ou à la quantité de froid absorbée précédemment par la plante (Laberche 2020). S'en suit le forçage, ou écodormance, défini par le débourrement (éclosion des bourgeons) et l'initiation de la croissance foliaire au sein des bourgeons. Le développement foliaire persiste, jusqu'au vieillissement des feuilles. Ces dernières perdent leur activité photosynthétique, introduisant, par conséquent, la phase de jaunissement, terminée par la phase de chute des feuilles mortes (de Wergifosse et al., 2020).



ANNEXE 5 : ÉQUATIONS GÉNÉRIQUES (AVEC ET SANS TOLÉRANCE À L'OMBRAGE)

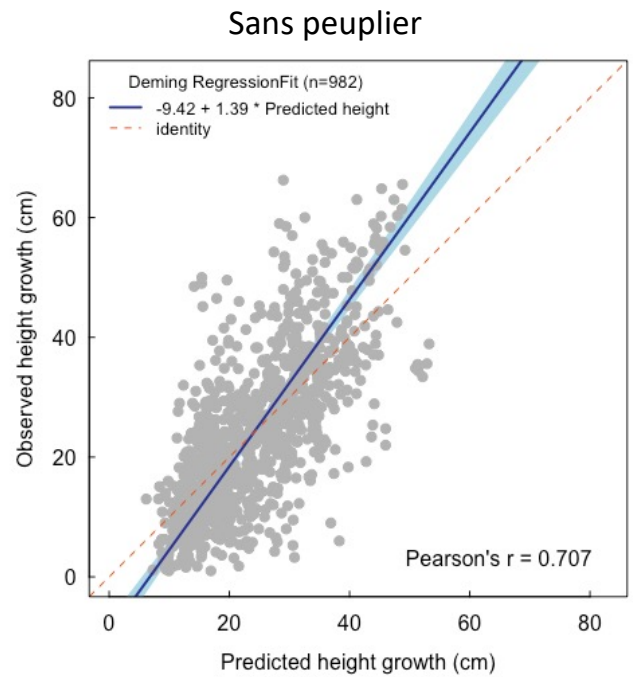
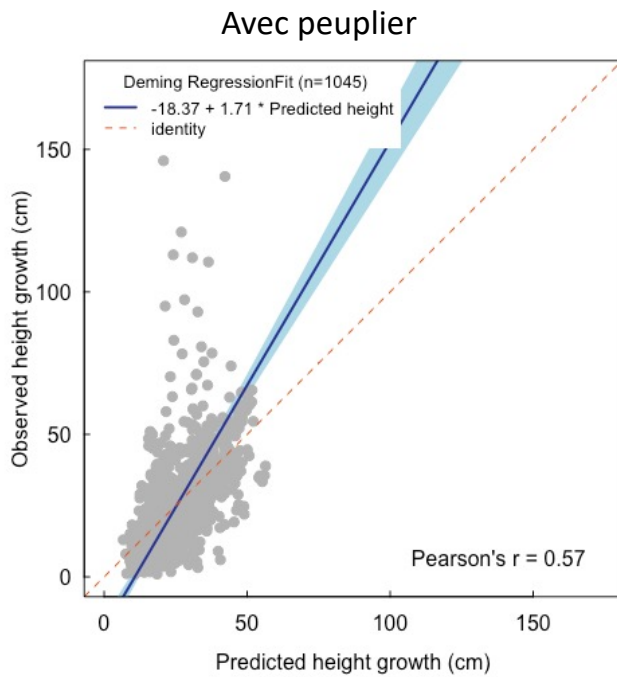
Équation générique avec tolérance à l'ombrage

Équation générique avec tolérance à l'ombrage							
Données utilisées	Paramètres	Intercept [I.C.]	Pente [I.C.]	M.E.	p-valeur	R de Pearson	
Beaudet-Badalamenti	Avec peuplier	a = 2.43 b = 5.46 c1 = -66.1 c2 = 77.4	-11.83 [-14.456 ; -9.204]	1.451 [1.358 ; 1.544]	0.476	0.6481	0.69
	Sans peuplier	a = 3.94 b = 2.0 c1 = 7.53 c2 = 0.37	-9.347 [-11.6 ; -7.094]	1.391 [1.304 ; 1.478]	0.500	0.8606	0.708



### Équation générique sans tolérance à l'ombrage

Équation générique sans tolérance à l'ombrage						
Données utilisées	Paramètres	Intercept [I.C.]	Pente [I.C.]	M.E.	p-valeur	R de Pearson
Avec peuplier	a = 4.21	-18.369 [-22.506 ; -14.232]	1.712 [1.562 ; 1.862]	0.325	0.911	0.57
	b = 2.11					
c = 8.06						
Beaudet-Badalamenti						
Sans peuplier	a = 3.90	-9.425 [-11.683 ; -7.167]	1.394 [1.307 ; 1.481]	0.50	0.894	0.707
	b = 2.0					
	c = 8.69					

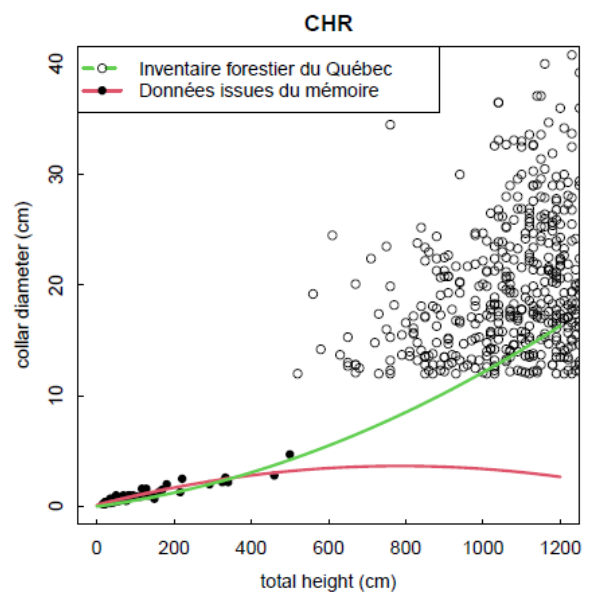
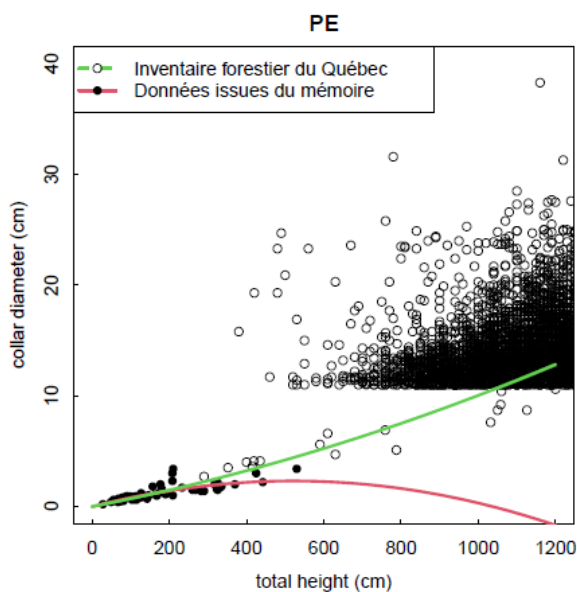
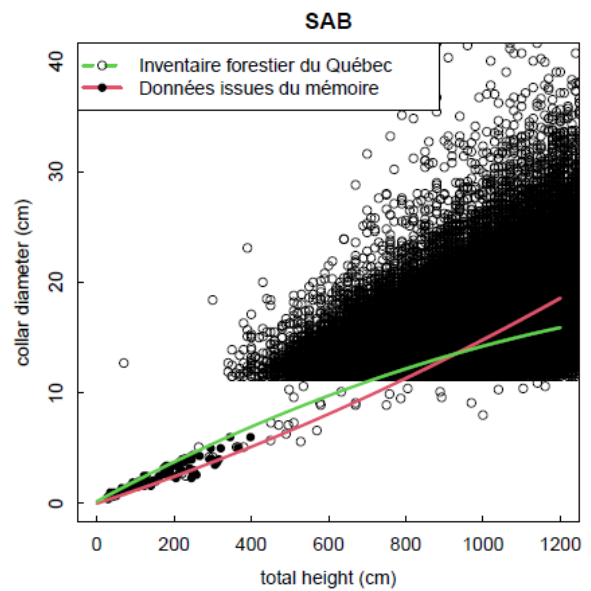
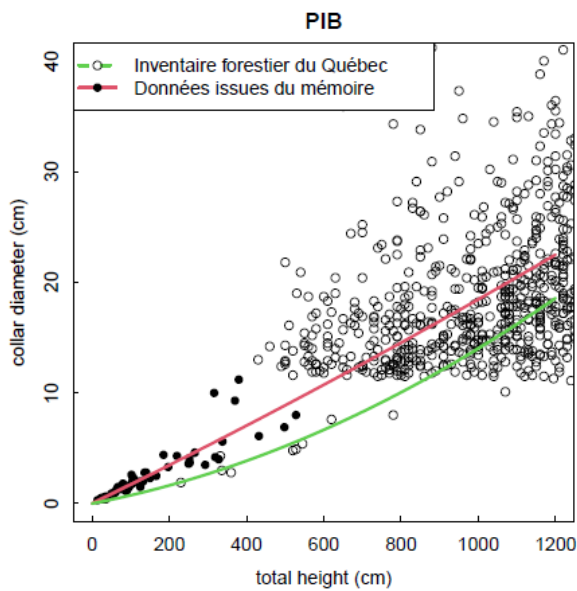


ANNEXE 6 : APPLICATION DE L'ÉQUATION GÉNÉRIQUE (SANS LES DONNÉES DE PEUPLIER) AUX ESPÈCES-CIBLES

Équation générique appliquée aux espèces-cibles, avec tolérance à l'ombrage							
Espèce (français)	Espèce (latin)	Paramètres	Intercept [I.C.]	Pente [I.C.]	M.E.	p-valeur	r de Pearson
Épinette	<i>Picea glauca</i>		-12.434 [-21.497 ; -3.371]	1.334 [0.966 ; 1.702]	0.279	6.445e-05	0.662
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i>	a = 3.94 b = 2.0	-22.85 [-33.472 ; -12.228]	1.976 [1.537 ; 2.415]	0.419	0.546	0.67
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i>	c <sub>1</sub> = 7.53 c <sub>2</sub> = 0.37	-13.327 [-21.557 ; -5.097]	1.886 [1.509 ; 2.263]	0.470	0.003	0.769
Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>		-13.917 [-22.569 ; -5.265]	1.919 [1.461 ; 2.377]	0.442	0.061	0.712

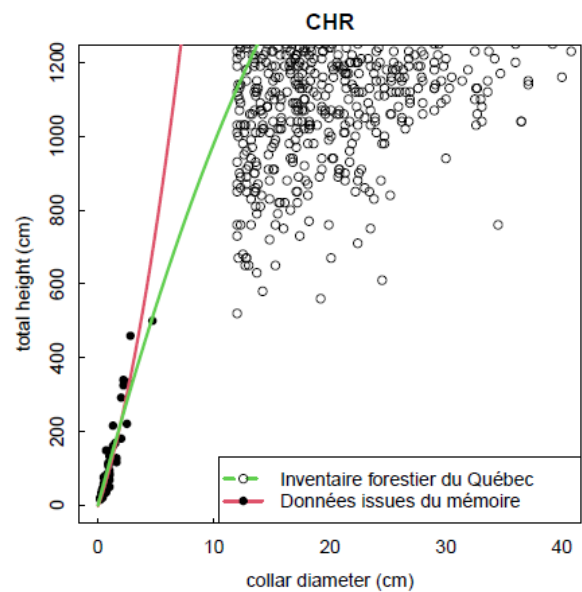
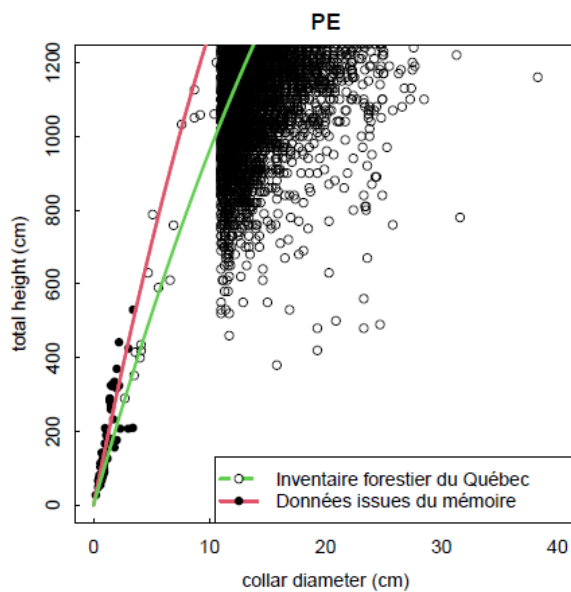
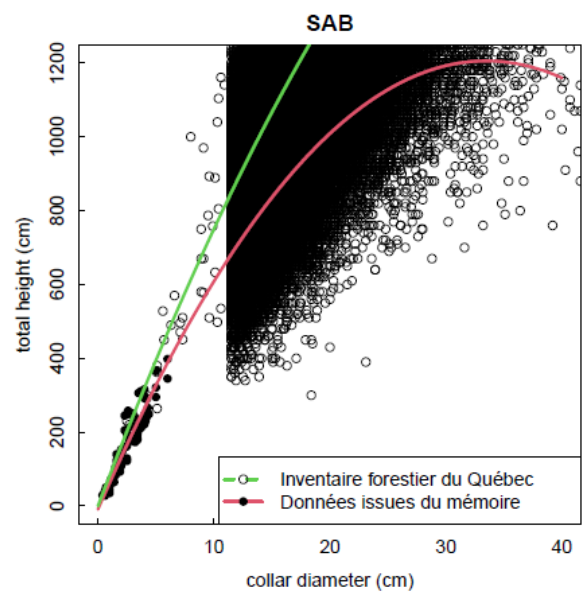
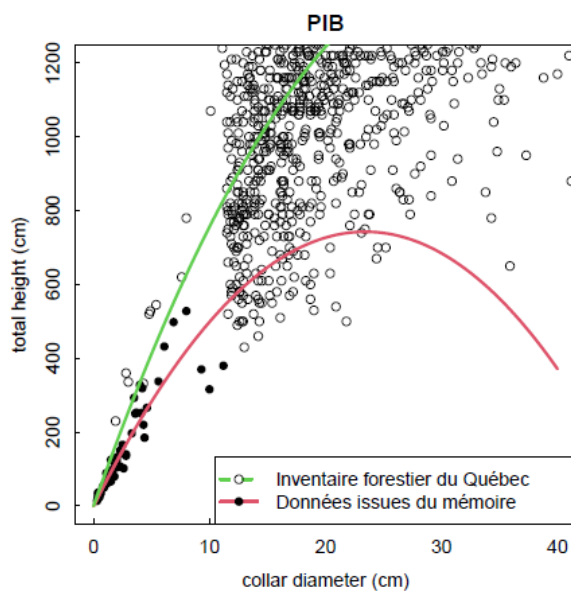
ANNEXE 7 : RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR ET LE DIAMÈTRE AU COLLET

Paramètres des relation de diamètre au collet, en fonction de la hauteur totale, pour chaque espèce				
Espèce	Peuplier faux-tremble	Pin blanc	Sapin baumier	Chêne rouge
<b>Inventaire forestier du Québec</b>	a = 0 b = 0.676e-02 c = 3.274e-06	a = 0 b = 0.674e-02 c = 7.247e-06	a = 1.982e-01 b = 1.874e-02 c = -4.711e-06	a = 0 b = 0.472e-02 c = 7.395e-06
<b>Données issues du mémoire</b>	a = -0.039 b = 0.90e-02 c = -8.563e-06	a = 0.013 b = 1.70e-02 c = 1.444e-06	a = 0 b = 1.149e-02 c = 3.312e-06	a = 1.25e-01 b = 0.90e-02 c = -5.733e-06

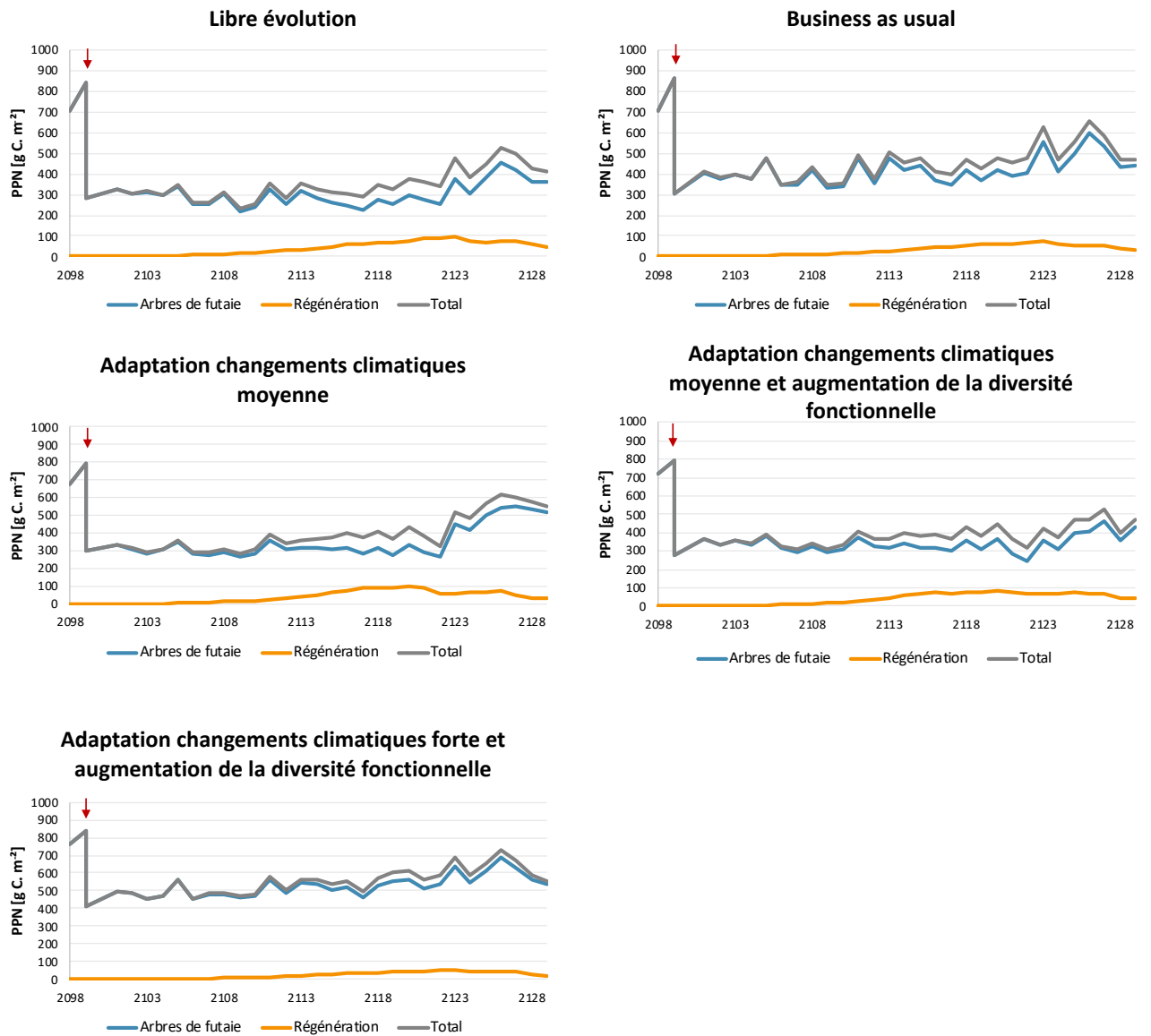


Paramètres des relation de la hauteur totale, en fonction du diamètre au collet, pour chaque espèce

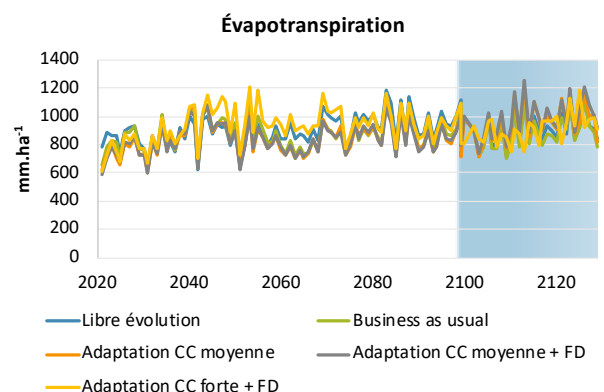
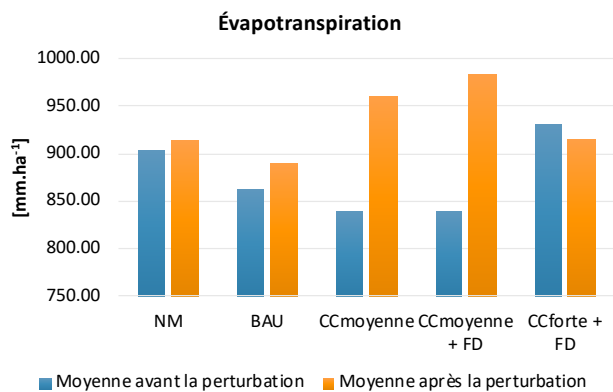
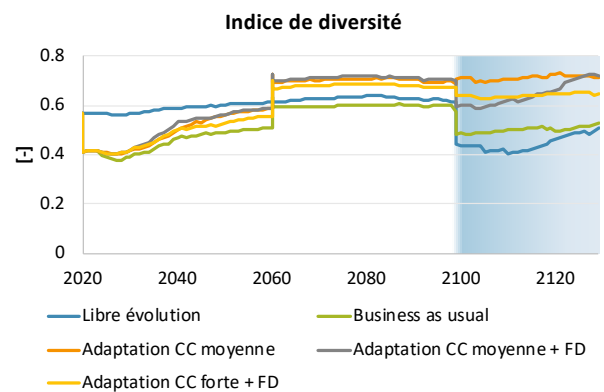
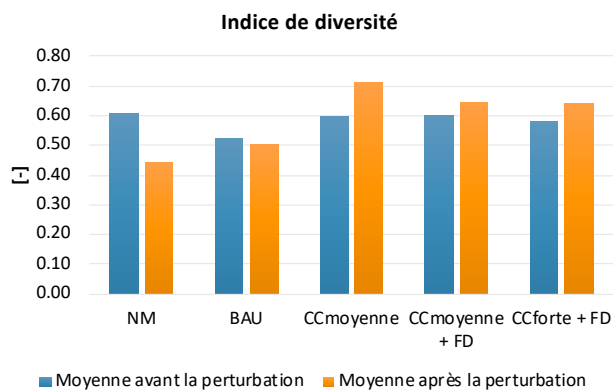
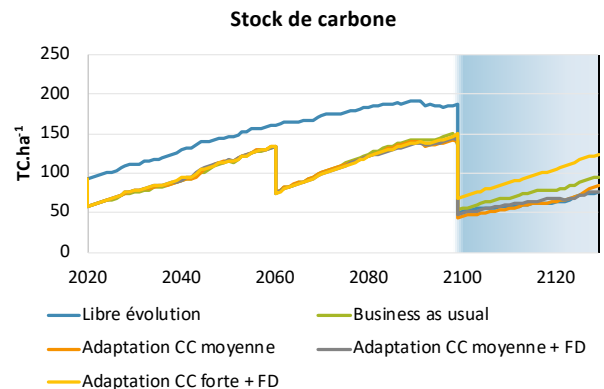
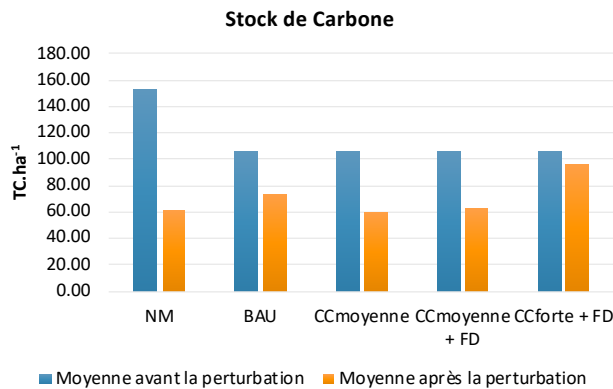
Espèce	Peuplier faux-tremble	Pin blanc	Sapin baumier	Chêne rouge
<b>Inventaire forestier du Québec</b>	a = 0 b = 110.850 c = -1.481	a = 0 b = 89.054 c = -1.3438	a = 0 b = 82.831 c = -0.781	a = 0 b = 117.471 c = -1.940
<b>Données issues du mémoire</b>	a = 0 b = 155.7 c = -2.760	a = -0.697 b = 63.462 c = -1.354	a = -9.017 b = 72.577 c = -1.084	a = -2.157 b = 92.052 c = 11.566



ANNEXE 8 : ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE NETTE, LORS DE LA PÉRIODE DE RÉCUPÉRATION, POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.



ANNEXE 9 : ÉVOLUTION ET MOYENNES DES INDICATEURS DESCRIPTIFS, POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.



## ANNEXE 10 : AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU PROGRAMME HETEROFOR, LORS DE LA RÉALISATION DU MÉMOIRE

### Améliorations :

- Calibration des équations de croissance en hauteur en fonction de la lumière (L. Badalamenti et A. Guignabert) ;
- Ajustement des équations liant le diamètre au collet et la hauteur (L. Badalamenti et A. Guignabert) ;
- Changement du type de modèle phénologique prédisant la date de débourrement pour certaines espèces (L. Badalamenti et A. Guignabert) ;
- Amélioration du fichier de discrétisation des données climatiques. La pluviométrie était étalée sur les 24 heures de la journée, ce qui impliquait une évapotranspiration beaucoup trop forte des plantes. De plus, un décalage horaire a été remarqué dans ces données, et a été modifié (A. Guignabert, M. Jonard, F. André) ;
- Ajustement des équations de houppier des érables rouges pour les gros arbres (A. Guignabert) ;
- Réajustement des paramètres de la fonction d'efficacité d'utilisation du carbone suite à des accroissements beaucoup trop élevés pour les gros arbres de certaines espèces (A. Guignabert).



## **« Les forêts dans un contexte incertain : Stratégies pour restaurer et améliorer la résilience de l'érablière rouge du Centre-du-Québec, à l'aide des données de régénération. »**

Le contexte climatique actuel est sans précédent. Il est tel qu'il n'est plus possible d'imaginer que les historiques feront le climat de demain. Sur ce fond de changements globaux, les forêts en pâtissent. Dépérissements et incapacité d'adaptation ont déjà été et continueront d'être observés. Au Centre-du-Québec, les érablières rouges (peuplements dont l'érable rouge est l'espèce majoritaire) dominent. Il est, cependant, attendu que les forêts de cette région subissent également le poids des changements climatiques. Bien que ces dérèglements soient difficilement prédictibles, il est possible de les anticiper, à l'aide de la modélisation. Ce concept décrit l'utilisation d'un modèle de croissance, dans une projection climatique, pour simuler l'évolution d'un peuplement forestier, et de sa régénération. Ainsi, le modèle HETEROFOR a été utilisé et paramétré sur base de données de régénération, dans le but de tester diverses stratégies de gestion adaptative d'une érablière rouge typique du Centre-du-Québec. Ces simulations ont permis d'évaluer et de quantifier la résilience (capacité d'adaptation et de réponse) du peuplement, face à une tempête, comme perturbation. En effet, avec les changements globaux, une hausse des événements climatiques extrêmes (tels que les tempêtes) est attendue. Cette démarche a permis d'écarter la Libre évolution (absence de gestion) du peuplement, mais n'a toutefois pas abouti à la définition d'un scénario spécifique pour l'adaptation des érablières rouges, face à une tempête. Elle aura donc contribué à la réflexion concernant la résilience des forêts du Centre-du-Québec, bien qu'il soit toujours possible de continuer les recherches, en vue d'identifier un scénario optimal.

**Lola Badalamenti**