

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PHÉNOLOGIE ET TAUX DE CROISSANCE RADIALE DES ARBRES À LA LIMITE SEPTENTRIONALE DU
DOMAINE BIOCLIMATIQUE DE L'ÉRABLIÈRE À BOULEAU JAUNE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE POUR LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

MAXENCE LEMIRE

DÉCEMBRE 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à vivement remercier mes codirecteurs, Daniel Kneeshaw et Nicolas Bélanger, de m'avoir initialement fait confiance afin de mener à bien ce projet de recherche. Je remercie également le coordinateur du réseau *SmartForests Canada*, Christoforos Pappas, de m'avoir offert l'opportunité de commencer ce projet. Je tiens aussi à leur exprimer ma plus sincère gratitude pour m'avoir conseillé, orienté et encouragé pendant la réalisation de ce mémoire. Un grand merci à Blandine Courcout pour l'aide et les conseils apportés durant les analyses statistiques. Un grand merci aussi à Shalini Oogathoo pour m'avoir grandement aidé pour le traitement des données dendrométriques avec *treenetproc* ainsi qu'avec les analyses statistiques. J'aimerais également remercier Mélanie Desrochers du Centre d'étude de la forêt pour avoir accepté de modéliser les cartes des sites de cette étude. Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du laboratoire iForêt de la TÉLUQ ainsi que ceux du laboratoire de recherche Daniel Kneeshaw de l'UQÀM pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée sur le terrain ou durant l'analyse des données récoltées, et sans lesquels ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour. Je tiens également à les remercier pour leur accueil chaleureux au sein de leur équipe ainsi que pour leurs encouragements. Je souhaite également remercier Miguel Montoro Girona, Fabio Gennaretti et les membres de leur laboratoire de m'avoir accueilli dans leur équipe pour quelques semaines et m'avoir permis d'en apprendre plus sur la dendrologie et la dendrochronologie.

Je tiens également à remercier chaleureusement la Fiducie de conservation des écosystèmes de Lanaudière ainsi que Larry Conochie et France Bourdon pour nous avoir donné l'accès au site de Sainte-Émélie-de-l'Énergie rendant ainsi possible cette étude. J'aimerais également remercier la Station de biologie des Laurentides de l'UdeM pour nous avoir permis d'installer des placettes expérimentales sur leur terrain ainsi que pour nous avoir fourni l'hébergement lorsque l'on en avait besoin.

Finalement, j'aimerais aussi remercier ma famille pour leur soutien inconditionnel lors de la poursuite de mes études et de mes rêves. Sans eux, absolument rien n'aurait été possible.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xi
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	xvi
RÉSUMÉ.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	
CADRE THÉORIQUE.....	4
1.1 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIOMES FORESTIERS QUÉBÉCOIS.....	4
1.1.1 COMMENT LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES PEUVENT AFFECTER LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS DU QUÉBEC ?.....	4
1.1.1.1 INFLUENCE DES PERTURBATIONS SUR LES FORETS	4
1.1.1.2 INFLUENCE DES TEMPERATURES DE L’AIR SUR LES FORETS.....	4
1.1.1.3 INFLUENCE DES PRÉCIPITATIONS SUR LES FORETS.....	5
1.1.1.4 INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA SAISON DE CROISSANCE DES ARBRES.....	6
1.1.2 LES PRÉDICTIONS POUR LE QUÉBEC MÉRIDIONAL.....	7
1.2 ANATOMIE DU BOIS ET HYDRAULIQUE VÉGÉTALE.....	9
1.2.1 LA PHYSIOLOGIE ET L’ANATOMIE DU BOIS	9
1.2.2 DIFFÉRENCES ET SIMILARITÉS ENTRE LES CONIFÈRES ET LES FEUILLUS.....	10
1.2.3 LES TROIS PRINCIPAUX TYPES DE BOIS.....	11
1.2.3.1 BOIS À PORES DIFFUS	11
1.2.3.2 BOIS À ZONES POREUSES.....	12
1.2.3.3 BOIS À TRACHÉIDES DES CONIFÈRES.....	13
1.3 IMPORTANCE DE LA CROISSANCE RADIALE INTRA-ANNUELLE CHEZ LES ARBRES	14
1.4 UTILISATION DES DENDROMÈTRES DE TRONC AFIN DE QUANTIFIER LA CROISSANCE RADIALE INTRA- ANNUELLE DES ARBRES.....	15
1.4.1 UTILISATION ET AVANTAGES DES DENDROMÈTRES DE TRONC	15
1.4.2 LES DÉSAVANTAGES DE L’UTILISATION DES DENDROMÈTRES DE TRONC.....	16
CHAPITRE 2	
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	18

2.1	PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE.....	18
2.2	QUESTIONS GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE.....	18
2.3	OBJECTIF ET SOUS-OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	19
2.4	HYPOTHÈSES.....	19
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	
21		
3.1	SITES D'ÉTUDE	21
3.2	VARIABLES ET PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE.....	27
3.3	ÉCHANTILLONNAGE ET ÉQUIPEMENT UTILISÉ	27
3.4	TRAITEMENTS DES DONNÉES RÉCOLTÉES.....	33
3.5	ANALYSES STATISTIQUES.....	35
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	
38		
4.1	SAISONS DE CROISSANCE	38
4.2	COMPARAISON DE LA CROISSANCE RADIALE ENTRE LES SITES POUR LES ESPÈCES COMMUNES AUX DEUX SITES	44
4.3	INFLUENCE DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL SUR LA CROISSANCE RADIALE.....	50
CHAPITRE 5	DISCUSSION	
53		
5.1	CROISSANCE RADIALE DE 2021 À 2023	53
5.1.1	DIFFÉRENCES ENTRE LES CONIFÈRES ET LES FEUILLUS AU NIVEAU DES SAISONS DE CROISSANCE ET DES TAUX DE CROISSANCE RADIALE	53
5.1.2	ABSENCE DE DIFFÉRENCE ENTRE LES ESPÈCES À PORES DIFFUS ET LES ESPÈCES À ZONES POREUSES.....	54
5.1.3	LES VARIABLES HYDROLOGIQUES EXPLIQUENT LE MIEUX LA CROISSANCE RADIALE DU SAPIN BAUMIER ET DU BOULEAU JAUNE.....	55
5.1.4	ABSENCE D'EFFETS DE LA LIMITE MÉRIDIONALE DES AIRES DE RÉPARTITION SUR LA CROISSANCE RADIALE	57
5.1.5	SENSIBILITÉ DE LA CROISSANCE RADIALE DES ESPÈCES ET GROUPES D'ESPÈCES AUX ALÉAS HYDROCLIMATIQUES	57
5.2	LIMITES DE L'ÉTUDE ET AMÉLIORATIONS POSSIBLES.....	59
	CONCLUSION.....	61
ANNEXE A		
	TABLEAU A-A : DIAMÈTRES À HAUTEUR DE POITRINE (DHP) DES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.....	63
ANNEXE B		
	TABLEAU A-B : DIAMÈTRES À HAUTEUR DE POITRINE (DHP) DES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.....	64

ANNEXE C	
TABLEAU A-C : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE L’ANNÉE 2020 AINSI QUE SELON LE SITE D’ÉTUDE.	65
ANNEXE D	
TABLEAU A-D : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L’ANNÉE 2021 AINSI QUE SELON LE SITE D’ÉTUDE.	66
ANNEXE E	
TABLEAU A-E : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L’ANNÉE 2022 AINSI QUE SELON LE SITE D’ÉTUDE.	67
ANNEXE F	
TABLEAU A-F : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L’ANNÉE 2023 AINSI QUE SELON LE SITE D’ÉTUDE.	68
ANNEXE G	
FIGURE A-G : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D8_A08 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE SAPIN BAUMIER (AbBa ; <i>Abies balsamea</i>).....	69
ANNEXE H	
FIGURE A-H : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D1_SF1_5 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L’ÉRABLE ROUGE (AcRu ; <i>Acer rubrum</i>).	70
ANNEXE I	
FIGURE A-I : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D10_SF1_10 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L’ÉRABLE À SUCRE (AcSa ; <i>Acer saccharum</i>).....	71
ANNEXE J	
FIGURE A-J : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D13_SF3_1 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE BOULEAU JAUNE (BeAl ; <i>Betula alleghaniensis</i>).	72
ANNEXE K	
FIGURE A-K : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D9_SF1_15 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE BOULEAU BLANC (BePa ; <i>Betula papyrifera</i>).	73
ANNEXE L	
FIGURE A-L : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L’ARBRE D1_SF2_6 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE HÊTRE À GRANDES FEUILLES (FaGr ; <i>Fagus grandifolia</i>).	74

ANNEXE M	
FIGURE A-M : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_A01 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE FRÊNE NOIR (FrNi ; <i>Fraxinus nigra</i>).....	75
ANNEXE N	
FIGURE A-N : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_B01 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L'ÉPINETTE BLANCHE (PiGl ; <i>Picea glauca</i>).....	76
ANNEXE O	
FIGURE A-O : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D3_A06 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE PEUPLIER FAUX-TREMBLE (PoTr ; <i>Populus tremuloides</i>).....	77
ANNEXE P	
FIGURE A-P : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D8_B05 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE THUYA OCCIDENTAL (ThOc ; <i>Thuja occidentalis</i>).....	78
ANNEXE Q	
FIGURE A-Q : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_SF2_16 AVEC LES DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2022 COMME EXEMPLE POUR LE CHÊNE ROUGE (QuRu ; <i>Quercus rubra</i>).....	79
ANNEXE R	
TABLEAU A-R : DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2021, LES DURÉES (<i>nbr_day</i>) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.	80
ANNEXE S	
TABLEAU A-S : DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2022, LES DURÉES (<i>nbr_day</i>) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.	81
ANNEXE T	
TABLEAU A-T : DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2023, LES DURÉES (<i>nbr_day</i>) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.	82
ANNEXE U	
TABLEAU A-U : DATES DE DÉBUT (<i>gro_start</i>) ET DE FIN (<i>gro_end</i>) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2021, LES DURÉES (<i>nbr_day</i>) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.....	83

ANNEXE V

TABLEAU A-V : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2022, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE. 84

ANNEXE W

TABLEAU A-W : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2023, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.....85

ANNEXE X

TABLEAU A-X : VALEURS MOYENNE DES DIFFÉRENTES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL (TEMPÉRATURES MOYENNES DE L’AIR (T_{air} , [°C]), DÉFICITS DE PRESSION DE VAPEUR (VPD, [kPa]), TEMPÉRATURES MOYENNES DU SOL (T_{sol} , [°C]), CONTENUS VOLUMÉTRIQUES EN EAU MOYENS DU SOL (VWC, [%]), ET POTENTIELS HYDRIQUES MOYENS DU SOL (SMS, [kPa])) POUR LES SAISONS DE CROISSANCE DE 2021, 2022 ET 2023 SELON LE SITE D’ÉTUDE AINSI QUE LES DIFFÉRENCES ENTRE CES DERNIERS.....86

ANNEXE Y

TABLEAU A-Y : RÉSULTATS ISSUS DES RÉGRESSIONS SÉQUENTIELLES AVEC MÉTHODE ASCENDANTE (RSMA) EXPLIQUANT LA CROISSANCE RADIALE À PARTIR DES VARIABLES INDÉPENDANTES HYDROCLIMATIQUES DES ANNÉES PRÉCÉDENTES. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITÉ (α) EST DE 0,050 ET N EST LE NOMBRE D’ÉCHANTILLONS ANALYSÉS.....87

RÉFÉRENCES88

LISTE DES FIGURES

Figure 1.2.1 : Schéma des structures microscopiques du bois d'un conifère (A) et d'un feuillu (B) (Pierre, 2011 ; Roignant, 2018).....	10
Figure 1.2.2 : Coupe transversale d'un érable rouge (<i>Acer rubrum</i> L.) comme exemple de bois à pores diffus (Meier, 2021a).....	12
Figure 1.2.3 : Coupe transversale d'un chêne rouge (<i>Quercus rubra</i> L.) comme exemple de bois à zones poreuses (Meier, 2021b).....	13
Figure 1.2.4 : Coupes transversales d'un sapin baumier (A) (Meier, 2022) et d'une épinette blanche (<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss ; B) (Meier, 2017) comme exemples pour les bois à trachéïdes des conifères.....	14
Figure 3.1.1 : Cartes de l'emplacement des deux sites d'échantillonnage (à gauche) et des placettes expérimentales (à droite).....	22
Figure 3.1.2 : Cartes de l'emplacement des placettes expérimentales ainsi que des arbres et espèces échantillonnés au site STE.....	25
Figure 3.1.3 : Cartes de l'emplacement des placettes expérimentales ainsi que des arbres et espèces échantillonnés au site SBL.....	25
Figure 3.3.1 : Exemple d'installation d'un <i>Type DC3 Circumference Dendrometer</i> dans la placette STE1 sur un frêne noir.....	28
Figure 3.3.2 : Schéma d'installation des différentes sondes sur les <i>WatchDog 1650 Micro Stations</i> pour les placettes expérimentales du site STE. Les microstations A sont équipées de deux <i>WatchDog Watermark Soil Moisture Sensors</i> (WM ; [%]), une <i>WatchDog WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensor</i> (WS ; [kPa]) et une <i>WatchDog External Temperature Sensor</i> (TS ; [°C]). Les microstations B sont équipées d'une WM ([%]), deux WS ([kPa]) et une TS ([°C]).....	31
Figure 3.3.3 : Exemple d'installation d'une microstation sur le sol de la placette STE2.....	31
Figure 3.4.1 : Exemple de calcul des dates de début (<i>gro_start</i> ; ligne pointillée rouge) et de fin (<i>gro_end</i> ; ligne pleine rouge) de la saison de croissance d'un arbre en utilisant la fonction <i>grow_seas</i> de <i>treenetproc</i> avec une incertitude de 5 % (<i>tol_seas</i> = 0,05) (Knüsel <i>et al.</i> , 2021).....	34
Figure 4.1.1 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à pores diffus (PD) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	41
Figure 4.1.2 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à zones poreuses (ZP) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	42

Figure 4.1.3 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à trachéides (conifères ; TR) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	43
Figure 4.2.1 : Comparaison des croissances radiales relatives annuelles (CRRRA ; [%]) des saisons de croissance 2021, 2022 et 2023 pour les quatres espèces présentes sur les deux sites d'étude. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	46
Figure 4.2.2 : Comparaison des taux absolus de croissance radiale annuelle (TACRA ; [mm/jour]) des saisons de croissance 2021, 2022 et 2023 pour les quatres espèces présentes sur les deux sites d'étude. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	47
Figure 4.2.3 : Comparaison des variations intraspécifiques de la croissance radiale relative annuelle (CRRRA ; [%]) des différentes espèces suivies selon l'année ainsi que le site d'étude et arrangée de façon croissante selon la valeur la plus élevée. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.....	48
Figure 4.2.4 : Comparaison des variations intraspécifiques du taux absolus de croissance radiale annuelle (TACRA ; [mm/jour]) des différentes espèces suivies selon l'année ainsi que le site d'étude et arrangée de façon croissante selon la valeur la plus élevée. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1.1 : Les différentes espèces d'arbres étudiées et leurs nombres par placette expérimentale.	26
Tableau 3.1.2 : Anatomie du bois selon l'espèce d'arbre étudiée et position des sites dans leur aire de répartition.....	26
Tableau 3.3.1 : Dispositions des sondes utilisées pour mesurer les variables du sol selon les placettes et les sites.	30
Tableau 4.3.1 : Régressions séquentielles avec méthode ascendante (RSMA) expliquant les taux de croissance radiale à partir des variables indépendantes hydroclimatiques des années concurrentes. Le niveau de significativité (α) est de 0,050 et N est le nombre d'échantillons analysés.	51

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

α	Niveau de significativité
AbBa	Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.)
AcRu	Érable rouge (<i>Acer rubrum</i> L.)
AcSa	Érable à sucre (<i>Acer saccharum</i> Marsh.)
ANOVA	Analyse de variance
BeAl	Bouleau jaune (<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.)
BePa	Bouleau blanc (<i>Betula papyrifera</i> Marsh.)
CRR	Croissance radiale relative
CRRA	Croissance radiale relative annuelle
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
DJC _{air}	Degré-jour de croissance de l'air
DJC _{sol}	Degré-jour de croissance du sol
FaGr	Hêtre à grandes feuilles (<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.)
FICEL	Fiducie de conservation des écosystèmes de Lanaudière
ForHyM	<i>Forest Hydrology Model</i>
ForSTeM	<i>Forest Soil Temperature Model</i>
FrNi	Frêne noir (<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.)
<i>gro_end</i>	Date de fin de la saison de croissance
<i>gro_start</i>	Date de début de la saison de croissance

$\log_{10}(\text{CRRA})$	Croissance radiale relative annuelle en logarithme décimal de base 10
$\log_{10}(\text{TACRA})$	Taux absolu de croissance radiale annuelle en logarithme décimal de base 10
MCG	Modèles de climat globaux
N	Taille de l'échantillon
$N_{\text{DJCair}}(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_{\text{DJCair}}(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 15\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 15 DJC
$N_{\text{DJCair}}(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_{\text{DJCair}}(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_{\text{DJCair}}(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 15\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 15 DJC
$N_{\text{DJCair}}(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_{\text{DJCair}}(20\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_{\text{DJCair}}(20\text{ }^{\circ}\text{C}; 15\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 15 DJC
$N_{\text{DJCair}}(20\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{air} ($T_{\text{base}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_{\text{DJCsol}}(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{\text{base}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_{\text{DJCsol}}(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 2\text{ DJC})$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{\text{base}} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 2 DJC

$N_DJCSol_{(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_DJCSol_{(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 8\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 8 DJC
$N_DJCSol_{(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_DJCSol_{(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 2\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 2 DJC
$N_DJCSol_{(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_DJCSol_{(15\text{ }^{\circ}\text{C}; 8\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 8 DJC
$N_DJCSol_{(5\text{ }^{\circ}\text{C}; 10\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 10 DJC
$N_DJCSol_{(5\text{ }^{\circ}\text{C}; 2\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 2 DJC
$N_DJCSol_{(5\text{ }^{\circ}\text{C}; 5\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 5 DJC
$N_DJCSol_{(5\text{ }^{\circ}\text{C}; 8\text{ DJC})}$	Nombre de jours où le nombre de DJC_{sol} ($T_{base} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) était supérieur ou égal à 8 DJC
$N_SMS_{10\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du SMS était supérieure ou égale à 10 kPa
$N_SMS_{100\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du SMS était supérieure ou égale à 100 kPa
$N_SMS_{30\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du SMS était supérieure ou égale à 30 kPa
$N_SMS_{60\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du SMS était supérieure ou égale à 60 kPa
$N_VPD_{0,50\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 0,50 kPa
$N_VPD_{0,70\text{ kPa}}$	Nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 0,70 kPa

N_VPD _{0,80 kPa}	Nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 0,80 kPa
N_VPD _{1,0 kPa}	Nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 1,0 kPa
N_VPD _{1,5 kPa}	Nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 1,5 kPa
N_VWC _{0 % - 10 %}	Nombre de jours où la valeur du VWC était inférieure à 10 %
N_VWC _{10 %}	Nombre de jours où la valeur du VWC était supérieure ou égale à 10 %
N_VWC _{20 %}	Nombre de jours où la valeur du VWC était supérieure ou égale à 20 %
N_VWC _{30 %}	Nombre de jours où la valeur du VWC était supérieure ou égale à 30 %
N_VWC _{40 %}	Nombre de jours où la valeur du VWC était supérieure ou égale à 40 %
<i>nbr_day</i>	Durée de la saison de croissance
P	Seuil de significativité (valeur de <i>p</i>)
PD	Bois à pores diffus
PFH.OR	Podzol ferro-humique orthique
PHF.OR	Podzol humo-ferrique orthique
PiGI	Épinette blanche (<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss)
PoTr	Peuplier faux-tremble (<i>Populus tremuloides</i> Michx.)
QuRu	Chêne rouge (<i>Quercus rubra</i> L.)
R	Coefficient de corrélation
R ²	Coefficient de détermination
RH	Humidité relative de l'air
RSMA	Régression séquentielle avec méthode ascendante

SBL	Site de la Station de biologie des Laurentides
SMS	Potentiel hydrique du sol
STE	Site de Sainte-Émélie-de-l'Énergie
TACR	Taux absolu de croissance radiale
TACRA	Taux absolu de croissance radiale annuelle
T_{air}	Température de l'air
T_{base}	Température de base
ThOc	Thuja occidental (<i>Thuja occidentalis</i> L.)
TR	Bois à trachéides (Conifères)
TS	<i>WatchDog External Temperature Sensor</i>
T_{sol}	Température du sol
VP_{air}	Pression de vapeur de l'air
VPD	Déficit de pression de vapeur
VP_{sat}	Pression de vapeur à saturation
VWC	Contenu volumétrique en eau du sol
WM	<i>WatchDog Watermark Soil Moisture Sensor</i>
WS	<i>WatchDog WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensor</i>
ZP	Bois à zones poreuses

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
°F	Degré Fahrenheit
cm	Centimètre
DJC	Degré-jour de croissance
kPa	Kilopascal
m	Mètre
m ² /ha	Mètre carré par hectare
mm	Millimètre
mm/jour	Millimètre par jour
troncs/ha	Troncs par hectare
μm	Micromètre
π	pi ($\pi \approx 3,1416$)

RÉSUMÉ

Le changement climatique actuel et futur a et aura des impacts significatifs sur la dynamique forestière du Québec. Une meilleure compréhension de la réponse des différentes espèces d'arbres face aux variations dans les conditions climatiques de l'air et du sol dans une zone de transition des essences forestières peut ainsi nous aider à mieux prédire l'évolution des forêts québécoises sous un climat changeant. L'objectif principal de notre étude était de caractériser la saison de croissance (début, fin et longueur) et de documenter les variations intra-annuelles de la croissance radiale selon les aléas hydroclimatiques de l'air et du sol chez 11 essences forestières appartenant à trois catégories de porosité et réparties sur deux sites situés à la transition entre les forêts décidues et mixtes, c.-à-d. Sainte-Émélie-de-l'Énergie et Saint-Hippolyte. Nous avons émis comme hypothèses (1) que des températures et un stress hydrique plus élevés devraient affecter davantage les conifères de façon négative, (2) que la saison de croissance et les taux de croissance radiale des conifères devraient être affectés plus négativement par ces conditions que celles des feuillus, (3) que les arbres à pores diffus et à zones poreuses devraient avoir des réponses de croissance divergentes à ces conditions et (4) que les essences situées à la limite sud de leur aire de répartition ne devraient pas être affectées plus négativement par de telles conditions que les essences situées à la limite nord de leur aire de répartition. Ainsi, des dendromètres de tronc ont été installés sur 62 arbres durant un peu plus de trois saisons de croissance afin de produire des données à haute résolution temporelle. Des sondes ainsi que des stations météorologiques ont aussi été installées afin de faire le suivi des conditions climatiques de l'air et du sol. Nos résultats suggèrent que les feuillus répondent de façon similaire aux variations environnementales, en ce qui a trait à leur saison de croissance, peu importe leur catégorie de porosité. Les essences situées au nord ou au sud de leur aire de répartition ont exhibé pas ou peu de différence dans leurs taux de croissance radiale entre les sites, même si les différences climatiques étaient notables. C'est le sapin baumier qui présentait le plus de différences entre les sites (saison de croissance plus longue et finissant plus tard, mais ne commençant pas plus tôt à Sainte-Émélie-de-l'Énergie) et ce sont les conifères qui présentaient les plus fortes relations entre la croissance radiale et les variables hydroclimatiques. Cependant, des études de plus longues durées seront nécessaires afin de mieux comprendre la dynamique de croissance des forêts dans cette zone de transition. De plus, des études incluant un plus large échantillon d'arbres, de sites et d'années ainsi qu'un plus grand gradient longitudinal seront nécessaires afin d'améliorer la précision des résultats obtenus. Toutefois, les résultats obtenus suggèrent que, à court terme, les changements climatiques futurs n'auront que peu d'impact sur le début, la fin et la durée de la saison de croissance ainsi que sur la croissance radiale de la majorité des espèces

arborescentes présentes dans cette forêt transitionnelle, notamment l'érable à sucre et le bouleau blanc, dont les variations de la saison de croissance et les taux de croissance radiale ne semblaient pas être expliquées par les variables hydroclimatiques.

Mots-clés : *croissance radiale, saison de croissance, dendromètre de tronc, limite de l'aire de répartition des espèces, variables hydroclimatiques de l'air et du sol, anatomie du bois*

ABSTRACT

Current and future climate change has and will have significant impacts on forest dynamics in Quebec. A better understanding of the response of different tree species to variations in air and soil hydroclimatic conditions in a forest species transition zone will help better predict the evolution of Quebec's forests under a changing climate. The main objective of our study was to characterize the growing season (start, end, and length) and to document intra-annual variations in radial growth of 11 tree species belonging to three xylem structure categories as a function of air and soil climatic variations. The studied trees were located in two sites in the transition between deciduous and mixed species at Sainte-Émélie-de-l'Énergie and Saint-Hippolyte. We hypothesized (1) that higher temperatures and water stress would be more detrimental to coniferous trees than to deciduous trees, (2) that growing season and radial growth rates of coniferous trees would be more negatively affected by such conditions than deciduous trees, (3) that diffuse-porous and ring-porous trees would have divergent growth responses to these conditions, and (4) that species located at their southern range limit would not be more negatively affected by such conditions than species at their northern range limit. Stem dendrometers were installed on 62 trees for a little over three growing seasons to produce high temporal resolution data. Probes and meteorological stations were also installed to monitor climatic conditions of the air and soil. Our results suggest that deciduous trees species respond similarly to temperature and moisture stress variations, with respect to their growing season, regardless of their xylem structure group. Tree species located at their northern or southern range limit exhibited little to no difference in their radial growth rates between sites despite significant climatic differences. Balsam fir showed the most differences between sites (a longer growing season that ends later, but that did not start earlier at Sainte-Émélie-de-l'Énergie), and coniferous trees showed the strongest links between radial growth and hydroclimatic variables. However, longer studies will be needed to better understand growth dynamics in this transition zone forests. In addition, studies including a larger sample of trees, sites and years as well as a greater longitudinal gradient will be needed to improve the precision of the results. Nevertheless, the results obtained suggest that, in the short term, future climate changes will have little impact on the start, end, and length of the growing season and on the radial growth of the majority of the tree species located in this transitional forest, notably sugar maple and white birch whose variations in growing season and radial growth rates were not explained by the hydroclimatic variables.

Keywords: *radial growth, growing season, stem dendrometer, species range limit, air and soil hydroclimatic variables, wood anatomy*

INTRODUCTION

Les mécanismes physiologiques responsables du transport de l'eau et de la croissance chez les arbres sont bien connus et documentés (Asbjornsen *et al.*, 2011 ; Brodribb, 2020 ; Forrester *et al.*, 2022 ; Savage *et al.*, 2010 ; Silva & Lambers, 2020 ; Venturas *et al.*, 2017 ; Zhou *et al.*, 2019). Toutefois, un effort supplémentaire est requis afin de développer des modèles prédictifs spécifiques aux différentes espèces arborescentes nord-américaines et prenant en compte les conditions environnementales au niveau local (D'Orangeville *et al.*, 2018). Ainsi, selon D'Orangeville *et al.* (2018), le développement de tels modèles nécessite de mesurer et de mieux comprendre les motifs récurrents et les mécanismes écophysiologiques propres à ces différentes espèces. De plus, selon Silva & Lambers (2020), bien que l'on sache que le bon fonctionnement des écosystèmes forestiers dépend des différentes interactions à l'interface sol-plante-atmosphère, les interactions biophysiques et biochimiques s'y déroulant ont rarement été étudiées. Par conséquent, bien que certains modèles processuels basés sur l'écophysiologie montre des prédictions de croissance assez robustes (Girardin *et al.*, 2016), il demeure difficile de prédire les effets des interactions sol-plante-atmosphère sur les réactions des écosystèmes aux divers cycles environnementaux ainsi que sur l'influence que ces réactions ont sur ces cycles (Silva & Lambers, 2020).

Dans le même ordre d'idée, l'absence de réduction de la croissance des forêts européennes durant la canicule de 2018, malgré une déshydratation importante des troncs combinée à une mortalité élevée causée par une sécheresse sans précédent, montre que l'impact des changements climatiques sur les forêts de l'hémisphère nord reste assez mal compris (Salomón *et al.*, 2022 ; Schuldt *et al.*, 2020). En effet, l'augmentation des températures accroît fortement le déficit de pression de vapeur, ce qui a pour conséquence d'augmenter les taux d'évapotranspiration des arbres et, de ce fait, de réduire l'accumulation de biomasse chez ces derniers (Asbjornsen *et al.*, 2011 ; Forrester *et al.*, 2022 ; Grossiord *et al.*, 2020 ; Savage *et al.*, 2010 ; Zhou *et al.*, 2019). À cet égard, Matula *et al.* (2023), ont observé que le réchauffement du climat faisait en sorte que la saison de croissance des arbres tempérés commençait plus tôt, mais en réduisait aussi la durée. Par ailleurs, la saison de croissance de plusieurs espèces d'arbres est principalement liée et influencée par l'humidité des sols, surtout dans les régions sèches (Griesbauer *et al.*, 2021 ; Li *et al.*, 2023). On peut aussi noter que, au cours des cent dernières années, la capacité des conifères à récupérer après un épisode de sécheresse a augmenté malgré le fait que leur sensibilité à un tel événement ait, elle aussi, augmenté (Li *et al.*, 2020). D'un autre côté, ceci reste controversé puisque les indices utilisés sont biaisés par les caractéristiques spectrales des chronologies sous étude (Klesse *et*

al., 2022). Il reste ainsi de nombreuses zones d'ombres quant à nos connaissances relatives à la relation entre les flux hydriques à l'intérieur du tronc des arbres et leur croissance, notamment en ce qui concerne la croissance radiale et les variations du diamètre des troncs (Liu & El-Kassaby, 2018). À cet égard, Johnson *et al.* (2016) suggèrent même que, à la lumière de leurs résultats et pour mieux comprendre les stratégies de résistance à la sécheresse des plantes, il est nécessaire d'effectuer plus de travaux de recherche sur la phénologie (par exemple, le débourrement au printemps, au début de la croissance, à la sénescence et à la fin de la croissance), la physiologie ainsi que sur l'hydraulique de l'entièreté de l'arbre plutôt que de se concentrer uniquement sur le xylème des branches.

Au Québec, les changements climatiques ont déjà des effets visibles sur la dynamique forestière de la province, comme la hausse de la fréquence et de l'intensité des perturbations naturelles (Gray, 2008 ; Logan *et al.*, 2011 ; van Bellen *et al.*, 2010 ; Williamson *et al.*, 2009). Cependant, malgré la grande diversité écoforestière du Québec (DIF, 2022 ; MRNFP, 2003 ; Morneau *et al.*, 2021), la majorité des études ne se concentrent que sur la forêt boréale ou mixte ainsi que sur certaines espèces commercialement importantes comme l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) (Ameray *et al.*, 2023 ; Deslauriers *et al.*, 2003 ; Duchesne *et al.*, 2006 ; Duchesne *et al.*, 2012 ; Duchesne *et al.*, 2020 ; Lesven *et al.*, 2024 ; Messaoud *et al.*, 2019 ; Oogathoo *et al.*, 2020 ; Oogathoo *et al.*, 2022 ; Solarik *et al.*, 2018 ; Villard *et al.*, 2019). Dans les régions plus tempérées, les études se sont concentrées beaucoup sur la régénération ainsi que sur une ou deux essences d'arbres différentes, dont l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) (Collin *et al.*, 2017 ; Collin *et al.*, 2018 ; Solarik *et al.*, 2018 ; Zarnovican, 2000 ; Zhang, 2014 ; Zhang *et al.*, 2015b). Même pour une espèce aussi commune et importante que le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), les études s'étant déroulées dans la forêt décidue de l'est du Canada ont surtout eu lieu dans la forêt acadienne et se sont concentrées sur la croissance d'arbres juvéniles (Akalusi & Bourque, 2018 ; Collier *et al.*, 2022 ; Vaughn *et al.*, 2021).

Au final, peu d'études se sont concentrées sur la relation entre la saison de croissance, les taux de croissance radiale des arbres et les diverses variables climatiques de l'air et du sol à la limite septentrionale des domaines bioclimatiques tempérés feuillus. Les modifications actuellement visibles dans la dynamique forestière du Québec méridional (DRF, 2017 ; Duchesne *et al.*, 2006 ; Gray, 2008 ; Logan *et al.*, 2011 ; van Bellen *et al.*, 2010 ; Williamson *et al.*, 2009) ainsi que l'évolution prévue du climat et du territoire québécois d'ici la fin du siècle (Logan *et al.*, 2011 ; Périé & de Blois, 2016 ; Zhang *et al.*, 2019) rendent nécessaire l'étude de ces relations dans les zones de transition entre les forêts feuillues et les forêts

résineuses ainsi que pour une plus grande variété d'espèces arborescentes. Ces études sont d'autant plus importantes, car les forêts canadiennes sont actuellement sous-représentées dans les réseaux mondiaux de données forestières (Kattge *et al.*, 2020 ; Pappas *et al.*, 2022b). De plus, au Canada, la compréhension globale des réponses écophysiological associées au climat ainsi que de la façon dont celles-ci varient selon les principaux types de peuplements forestiers n'est pas très avancée (Pappas *et al.*, 2022b). Ceci est d'autant plus important que la croissance radiale des troncs est un processus écologique clé menant à la séquestration du carbone à long terme (Eitel *et al.*, 2023). Malgré les impacts de la croissance des arbres pour le cycle du carbone, de grandes incertitudes demeurent quant à la manière dont la phénologie de la croissance radiale (début, milieu et fin de la saison de croissance) et le taux de croissance radiale seront affectés par les changements climatiques (Eitel *et al.*, 2023).

CHAPITRE 1

CADRE THÉORIQUE

1.1 CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET BIOMES FORESTIERS QUÉBÉCOIS

1.1.1 COMMENT LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES PEUVENT AFFECTER LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS DU QUÉBEC ?

1.1.1.1 INFLUENCE DES PERTURBATIONS SUR LES FORETS

Les dynamiques forestières découlent de l'interaction entre des facteurs chroniques et des perturbations transitoires avec les différents processus démographiques liés au recrutement, à la croissance et à la mortalité (McDowell *et al.*, 2020). Par ailleurs, le taux de mortalité de la majorité des populations arborescentes matures nord-américaines a presque doublé au cours des quatre dernières décennies, notamment à cause des changements climatiques et de l'utilisation des terres par les humains (McDowell *et al.*, 2020).

Dans la zone tempérée nordique québécoise, il est notamment attendu que les événements d'assèchement des sols s'intensifient avec les changements climatiques, provoquant une augmentation de leur sévérité, de leur durée ainsi que de leur étendue (Cholet *et al.*, 2022). En Amérique du Nord, une intensification du stress hydrique est notamment soupçonnée d'être liée à l'augmentation de la mortalité des arbres et d'être l'un des principaux facteurs responsables du déclin des écosystèmes forestiers des régions tempérées (Cholet *et al.*, 2022 ; Urli *et al.*, 2023). Cette hausse de la mortalité induite par le climat, combinée aux changements dans les régimes de perturbations naturelles, aux changements dans la croissance des espèces arborescentes, aux accidents de régénération ainsi qu'à la capacité limitée des arbres à bien répondre aux changements climatiques, entraîneront invariablement la modification des écosystèmes forestiers québécois ainsi que des services écosystémiques qu'ils offrent (Boisvert-Marsh *et al.*, 2022 ; Boulanger *et al.*, 2021).

1.1.1.2 INFLUENCE DES TEMPERATURES DE L'AIR SUR LES FORETS

L'augmentation des températures a de nombreux effets sur la dynamique forestière. Au niveau biotique, la température moyenne a un effet direct sur plusieurs processus biologiques liés au métabolisme ainsi qu'à la croissance et la phénologie des arbres (Logan *et al.*, 2011). Par exemple, des températures automnales plus élevées ont tendance à réduire la croissance des arbres situés au sud du 40^e parallèle

nord, notamment à cause du stress hydrique que cela induit (Tei *et al.*, 2021). Par ailleurs, Toledo *et al.* (2010) ont montré que, lorsque comparé à la composition chimique des sols et aux perturbations, le climat est le facteur ayant la plus grande influence sur les taux de croissance des arbres et des forêts. Le réchauffement climatique a aussi des effets phénologiques plus subtils, notamment par l'augmentation de la durée de la saison de croissance en permettant à certaines espèces, comme l'érable à sucre, d'avoir un débourrement plus hâtif ou à d'autres, comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), de fleurir beaucoup plus tôt (Williamson *et al.*, 2009). D'un autre côté, Matula *et al.* (2023) montrent que le réchauffement du climat pourrait plutôt réduire la longueur de la saison de croissance des arbres des régions tempérées, mais aussi faire en sorte que la saison de croissance de ces arbres commence plus tôt. À noter que cette influence de la température est clairement plus importante à la limite septentrionale des aires de répartition des espèces affectées, ce qui requiert que l'on étudie l'écophysiologie des forêts dans ces marges (Logan *et al.*, 2011). Plusieurs études ont d'ailleurs montré que, dans l'hémisphère nord, la croissance des arbres situés au sud de leur aire de répartition était généralement négativement corrélée à la température alors que la croissance des arbres situés au nord de leur aire de répartition était plutôt généralement corrélée positivement avec cette variable (Bošel'a *et al.*, 2014 ; de Luis *et al.*, 2013 ; Mäkinen *et al.*, 2002 ; Marquis, 2016 ; St. George & Ault, 2014). Bien entendu, en cas d'acclimatation phénotypique ou d'adaptation génétique locale, les arbres proches de la limite de leur aire de répartition peuvent démontrer une sensibilité comparable à celle du reste de la population (Girardin *et al.*, 2024).

De plus, cette influence de la température moyenne sur la croissance et la phénologie des arbres a aussi un impact sur les divers mécanismes de la compétition intra- et interspécifique, ce qui peut influencer la distribution ainsi que la migration des végétaux (Logan *et al.*, 2011 ; Périé *et al.*, 2014 ; Vellend *et al.*, 2021). Cependant, au Québec, la migration des espèces arborescentes vers des latitudes ou des altitudes plus élevées due aux changements climatiques semble être actuellement négligeable, localisée et contrainte par des facteurs non climatiques biotiques et abiotiques comme les sols (Carteron *et al.*, 2020 ; Collin *et al.*, 2017 ; Collin *et al.*, 2018 ; Logan *et al.*, 2011 ; Vellend *et al.*, 2021).

1.1.1.3 INFLUENCE DES PRECIPITATIONS SUR LES FORETS

Avec la température moyenne de l'air, les précipitations correspondent à l'autre grande variable climatique influençant la distribution et la croissance des végétaux (Harvey *et al.*, 2019 ; Logan *et al.*, 2011 ; Wu *et al.*, 2011). La saisonnalité de cette variable est cruciale pour la survie et la croissance de ces organismes. Dans les climats tempérés, un apport adéquat en précipitations durant la saison estivale

influencera positivement ces deux paramètres de la croissance (Harvey *et al.*, 2019 ; Logan *et al.*, 2011). De plus, leurs impacts sont particulièrement importants en début de saison puisque de faibles précipitations peuvent entraîner le ralentissement ou l'arrêt de la croissance (Logan *et al.*, 2011). Kwiaton & Wang (2015) ont d'ailleurs montré que, dans l'est du Canada, les précipitations étaient corrélées avec la croissance radiale de plusieurs espèces de feuillus tels que le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), l'érable à sucre et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.).

À l'inverse, durant la saison hivernale, des précipitations liquides trop importantes causées par un climat trop doux peuvent impacter négativement la survie des plantes puisque les sols seront alors plus vulnérables au gel, ce qui peut affecter l'intégrité physique des racines ainsi que leur fonctionnement et ainsi retarder le début de la croissance au printemps ou en accélérer la fin à l'automne (Logan *et al.*, 2011). Par contre, si la couverture neigeuse est suffisamment importante durant l'hiver, cette dernière agit comme un isolant ayant pour effet de réguler la température du sol et de réduire l'occurrence des événements de gel au niveau du sol, ce qui augmente la survie des arbres durant la saison de croissance suivante en protégeant les racines (Logan *et al.*, 2011). À noter que plusieurs études ont montré que, dans l'hémisphère nord, la croissance des arbres situés au sud de leur aire de répartition était généralement corrélée positivement avec les précipitations (Bošel'a *et al.*, 2014 ; de Luis *et al.*, 2013 ; Mäkinen *et al.*, 2002 ; Marquis, 2016 ; St. George & Ault, 2014).

1.1.1.4 INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA SAISON DE CROISSANCE DES ARBRES

La phénologie est définie comme l'étude des événements biologiques cycliques (Vilhar *et al.*, 2013). Chez les plantes, elle peut inclure la floraison, le débourrement, la formation et la dispersion des graines ainsi que la croissance et la chute des feuilles (ou sénescence) en relation avec les conditions climatiques (Davi *et al.*, 2011 ; Vilhar *et al.*, 2013).

Les effets des changements climatiques sur la phénologie des plantes sont observés à l'échelle mondiale (Montgomery *et al.*, 2020). Malgré tout, la façon dont les réponses phénologiques au réchauffement climatique différeront et si elles différeront d'une année à l'autre, d'une saison à l'autre, d'un habitat à l'autre ou d'une espèce à l'autre sont mal comprises actuellement (Montgomery *et al.*, 2020). Par exemple, une étude de Grossiord *et al.* (2022) suggère que, en Europe, le réchauffement du climat pourrait allonger la durée de la saison de croissance des arbres et ainsi compenser pour la faible activité photosynthétique engendrée par des périodes de sécheresse plus chaudes. D'un autre côté, une étude de Matula *et al.* (2023)

suggère plutôt que le réchauffement climatique raccourcira la saison de croissance dans les forêts tempérées européennes, provoquant ainsi une baisse des taux de croissance et de leur productivité.

Il est aussi connu que la phénologie printanière des arbres des forêts tempérées a eu lieu significativement plus tôt durant la dernière décennie dû au réchauffement du climat (Beil *et al.*, 2021 ; Jing *et al.*, 2021 ; Vilhar *et al.*, 2013). Cependant, il a aussi été observé des débuts tardifs de la croissance au printemps malgré un réchauffement climatique qui s'intensifie (Beil *et al.*, 2021). Ces derniers suggèrent que ce phénomène pourrait être causé par le réchauffement du climat à l'automne, entraînant une sénescence plus tardive, favorisant un retard de l'entrée en dormance des arbres et donc un début de croissance plus tardif au printemps. Par ailleurs, Zhang *et al.* (2023) ont montré que, dans l'hémisphère nord, la sénescence de la canopée se produit de plus en plus tardivement depuis les années 1980 à cause du réchauffement global du climat. À noter que ces changements diffèrent spatialement et selon les espèces ayant une phénologie printanière différente (Jing *et al.*, 2021). Au Canada, il est d'ailleurs peu probable que les différentes espèces d'arbres des régions boréales et tempérées réagissent phénologiquement toutes de la même façon au réchauffement du climat (Jing *et al.*, 2021).

1.1.2 LES PRÉDICTIONS POUR LE QUÉBEC MÉRIDIONAL

D'ici 2090, certaines simulations des modèles de climat globaux (MCG) prévoient, dans le sud du Québec, une augmentation de la température quotidienne moyenne hivernale allant d'environ 3 °C à 7 °C ainsi qu'une augmentation de la température quotidienne estivale allant d'environ 2 °C à 5 °C par rapport à la période de référence 1971-2000 (Logan *et al.*, 2011) avec une moyenne de 3,7 °C (Berteaux *et al.*, 2014 ; Périé & de Blois, 2015). En ce qui a trait aux températures annuelles moyennes, l'augmentation devrait se situer entre 3,5 °C et 7,5 °C d'ici 2100 (Boulanger *et al.*, 2023). Par ailleurs, entre 2071-2100, les simulations des MCG prévoient une augmentation du nombre de degrés-jours de croissance de 45,9 % par rapport à la période de référence 1961-1990 (Berteaux *et al.*, 2014). Pour les périodes 2040-2069 et 2070-2099, les modèles ForHyM (*Forest Hydrology Model*) et ForSTeM (*Forest Soil Temperature Model*) projettent une augmentation de la température moyenne annuelle des sols se situant entre 1,1 °C et 1,9 °C ainsi qu'entre 1,9 °C et 3,3 °C, respectivement, par rapport à la période de référence 1971-2000 (Houle *et al.*, 2012). L'ensemble de ces changements climatiques font en sorte que les isothermes, soit les lignes qui joignent les points où la température moyenne de l'air est identique, se déplacent rapidement vers le nord à une vitesse de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres par décennie (Berteaux *et al.*, 2014 ; Périé & de Blois, 2015).

Pour les précipitations totales quotidiennes, par rapport à cette même période de référence, les simulations des MCG prévoient, d'ici 2090, une augmentation hivernale allant d'environ 10 % à 35 %, mais des variations estivales pouvant aller d'une diminution d'environ 15 % jusqu'à une augmentation d'environ 15 % (Logan *et al.*, 2011). Selon Boulanger *et al.* (2023), les précipitations sur le territoire québécois pourraient augmenter de 7 % à 10 % d'ici 2100. Par ailleurs, d'ici 2090, les simulations des MCG prévoient aussi une augmentation estivale de l'indice de sécheresse canadien pouvant aller jusqu'à plus de 50 % par rapport à la période de référence 1971-2000 pour le sud du Québec (Logan *et al.*, 2011). De plus, d'ici 2050, il est prévu que la hausse constante des températures entraînera une importante diminution du manteau neigeux durant les mois d'octobre et de novembre ainsi qu'une fonte de plus en plus précoce dudit manteau neigeux au printemps (Derksen *et al.*, 2019 ; Zhang *et al.*, 2019).

En ce qui a trait aux impacts des changements climatiques sur les érablières, Périé & de Blois (2016) ont montré qu'une grande partie de ces biomes forestiers deviendront moins favorables, voire impropres, au développement de plusieurs espèces arborescentes typiques de ces écosystèmes d'ici 2080. L'érable à sucre devrait être l'une des seules espèces d'importance qui pourra encore trouver des habitats favorables dans la quasi-totalité du Québec méridional (Périé & de Blois, 2016). Toutefois, depuis le début des années 1980, la croissance de cette espèce a grandement été réduite à cause de l'accumulation d'événements de stress climatiques dans la région (Moreau *et al.*, 2020). Par ailleurs, il est possible que plusieurs espèces n'ayant historiquement aucun habitat favorisant leur implantation sur le territoire québécois puissent trouver des conditions pédoclimatiques favorables à leur développement d'ici la fin du 21^e siècle (Périé *et al.*, 2014).

À noter que, malgré les prédictions concernant le maintien d'habitats favorables au développement de l'érable à sucre dans le sud du Québec, l'abondance et la densité de cette espèce sont en déclin depuis plusieurs décennies dans toute la zone tempérée nordique (DRF, 2017). En effet, les conditions environnementales changeantes empêchent un recrutement suffisant de jeunes tiges d'érable à sucre et favorisent beaucoup plus la croissance du hêtre à grandes feuilles qui remplace progressivement l'érable à sucre dans la majorité de la sous-zone de la forêt décidue (DRF, 2017). Toutefois, ce changement de dynamique ne semble pas être uniquement dû aux changements climatiques, mais aussi à des changements dans la chimie des sols affectant leur acidité et la disponibilité de certains éléments nutritifs (Collin *et al.*, 2017 ; Collin *et al.*, 2018 ; Duchesne *et al.*, 2006).

1.2 ANATOMIE DU BOIS ET HYDRAULIQUE VÉGÉTALE

1.2.1 LA PHYSIOLOGIE ET L'ANATOMIE DU BOIS

Plusieurs structures distinguent les feuillus et les conifères (Figure 1.2.1). Les conifères possèdent une structure de base plus simple que celle des feuillus puisqu'ils ne possèdent que deux types de cellules (trachéides et canaux résinifères) ne possédant que peu de variations structurelles entre elles (Wiedenhoef, 2013). Entre ces deux types de cellules, les trachéides (Figure 1.2.1A) sont les plus nombreuses puisqu'elles composent près de 90 % du volume du bois des conifères (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Wiedenhoef, 2013). Il s'agit d'assemblages de longues cellules hexagonales, tubulaires et creuses généralement cent fois plus longues que larges servant au transport de la sève brute (Pambou Nziengui, 2019 ; Wiedenhoef, 2013).

Chez certains genres de la famille des *Pinaceae* (Jourez, 2010), il est possible d'observer des structures appelées canaux résinifères (Figure 1.2.1A). Ces structures servent à distribuer la résine produite par des cellules parenchymateuses spécialisées (Wiedenhoef, 2013). Dans les tissus ligneux orientés axialement, les canaux résinifères se trouvent au milieu des trachéides et sont habituellement des structures solitaires, mais peuvent aussi être trouvés par paires ou en petits groupes tangentiels (Jourez, 2010). À noter que, chez les espèces des régions tempérées, les canaux résinifères sont des structures relativement rares (Benabdallah *et al.*, 1996).

Chez les feuillus, le transport de la sève brute est assuré par les vaisseaux (Figure 1.2.1B). Les vaisseaux sont composés de cellules à paroi mince appelées éléments de vaisseau qui sont assemblées afin de former de larges structures tubulaires, creuses et beaucoup plus courtes que les trachéides des conifères (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Pambou Nziengui, 2019 ; Wiedenhoef, 2013). Les caractéristiques ainsi que l'emplacement de ces structures dans le bois permettent de facilement regrouper les feuillus dans deux principaux groupes distincts, soit les bois à pores diffus et les bois à zones poreuses (Benabdallah *et al.*, 1996). Ces deux groupes fonctionnels réagissent généralement différemment face à des conditions de stress hydrique semblables, que ce soit par des différences dans leur résilience ou leur résistance au stress hydrique ou dans les facteurs caractérisant leurs réponses (Buttó *et al.*, 2021). Toutefois, la perte de productivité semble être généralement équivalente, peu importe l'intensité du stress hydrique rencontré (Buttó *et al.*, 2021). À noter qu'un troisième groupe existe, soit les bois à pores semi-diffus, mais ce dernier est peu commun (Benabdallah *et al.*, 1996).

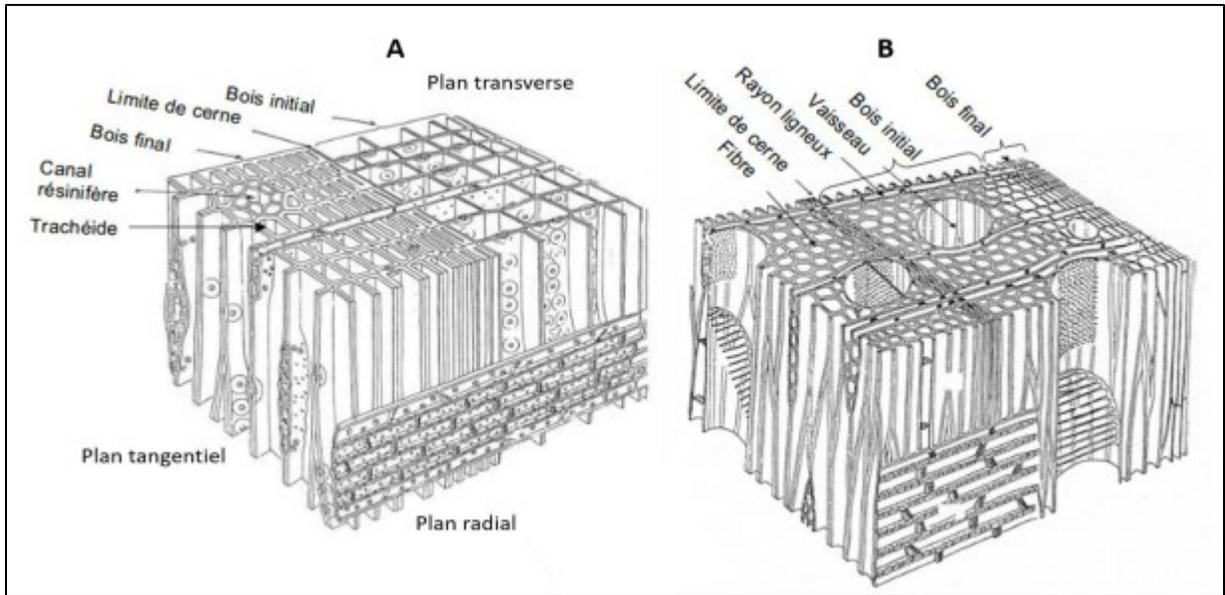


Figure 1.2.1 : Schéma des structures microscopiques du bois d'un conifère (**A**) et d'un feuillu (**B**) (Pierre, 2011 ; Roignant, 2018).

À noter que la croissance radiale implique la production de nouvelles cellules dans le xylème et dans le phloème par le cambium ainsi que l'expansion de ces cellules suivie par la formation de la paroi cellulaire (Etzold *et al.*, 2021). Cette expansion cellulaire mène à l'accroissement irréversible du diamètre du tronc et correspond à la croissance radiale (Etzold *et al.*, 2021).

1.2.2 DIFFÉRENCES ET SIMILARITÉS ENTRE LES CONIFÈRES ET LES FEUILLUS

En termes de potentiel de croissance et d'assimilation de ressources, la caractéristique principale permettant de différencier les conifères et les feuillus est l'absence de vaisseaux chez les premiers (Brodrigg *et al.*, 2005). Les vaisseaux des feuillus leur permettent de produire un bois pouvant transporter beaucoup plus d'eau que celui des conifères, ce qui accroît grandement leur capacité photosynthétique (Becker *et al.*, 1999 ; Brodrigg *et al.*, 2005). Toutefois, malgré ces différences, la conductivité hydraulique des deux groupes ne semble pas être différente lorsque l'entièreté de la plante est prise en compte (Becker *et al.*, 1999). D'un autre côté, les vaisseaux des feuillus sont des conduits ayant un large lumen, ce qui les rend vulnérables aux embolies causées par des conditions de gel (Brodrigg *et al.*, 2005). Au contraire, le faible diamètre des trachéides fait en sorte que les conifères y sont, pour la plupart, immunisés (Brodrigg *et al.*, 2005), ce qui explique pourquoi ceux-ci peuvent cohabiter aisément avec les populations de feuillus à pores diffus dans les forêts tempérées (Venturas *et al.*, 2017). La résistance à la cavitation d'une majorité

de conifères est d'ailleurs beaucoup plus élevée que ce qui peut être observé chez les feuillus (Larter, 2016). De plus, afin de compenser la relative inefficacité des trachéides, les conifères maximisent le nombre de trachéides au sein de leur bois et maintiennent plusieurs années d'aubier fonctionnel (Venturas *et al.*, 2017). D'un autre côté, au Québec, la croissance des conifères semble surtout dépendre des facteurs climatiques alors que celle des feuillus semble principalement être influencée par la quantité de lumière reçue par les arbres (Soubeyrand *et al.*, 2024).

1.2.3 LES TROIS PRINCIPAUX TYPES DE BOIS

1.2.3.1 BOIS À PORES DIFFUS

Les bois à pores diffus sont l'un des deux principaux types de bois que l'on peut retrouver chez les feuillus, notamment chez les érables (*Acer spp.*), bouleaux (*Betula spp.*), peupliers (*Populus spp.*) et hêtres (*Fagus spp.*) (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Wiedenhoef, 2013). Comme la Figure 1.2.2 le montre, cette catégorie est caractérisée principalement par la présence d'une distribution relativement uniforme des vaisseaux (Benabdallah *et al.*, 1996). De plus, la taille de ces derniers varie très peu et est relativement la même entre le bois initial et le bois final (Wiedenhoef, 2013). Même si les vaisseaux que l'on retrouve dans les bois à pores diffus sont plus petits que ceux que l'on retrouve dans les bois à zones poreuses et que la conductivité hydraulique dépend généralement de la taille des vaisseaux, les vaisseaux des premiers possèdent une plus grande conductivité hydraulique que les vaisseaux des seconds (Buttó *et al.*, 2021 ; Zach *et al.*, 2010). Cette caractéristique rend les arbres appartenant à cette catégorie généralement moins vulnérables à la cavitation que les arbres ayant un bois à zones poreuses (Buttó *et al.*, 2021). Cependant, lors de sécheresses, les espèces à pores diffus des régions tempérées semblent être moins efficaces dans leur contrôle de la transpiration stomatique que les espèces à zones poreuses, ce qui entraîne souvent une diminution de leur potentiel hydrique, puis une diminution de la quantité d'eau que l'arbre transporte (Buttó *et al.*, 2021). À noter que Steppe & Lemeur (2007) suggèrent que la résistance hydraulique du xylème des arbres à pores diffus est beaucoup plus grande que celle des arbres à zones poreuses.

Dans un autre ordre d'idées, D'Orangeville *et al.* (2022) ont montré que les arbres à pores diffus prennent environ vingt jours de moins que les arbres appartenant aux autres groupes fonctionnels pour atteindre la moitié de leur croissance radiale annuelle. D'un autre côté, les espèces appartenant à ce groupe fonctionnel atteignent leur taux de croissance maximal près d'un mois après les arbres à zones poreuses et les conifères (D'Orangeville *et al.*, 2022). Selon D'Orangeville *et al.* (2022), cette atteinte plus tardive de leur taux de croissance maximal coïncide avec des périodes durant lesquelles l'évapotranspiration est

maximisée et l'eau est moins disponible, ce qui expose les arbres à pore diffus à un déficit hydrique plus élevé que les autres groupes fonctionnels durant leur pic de croissance.

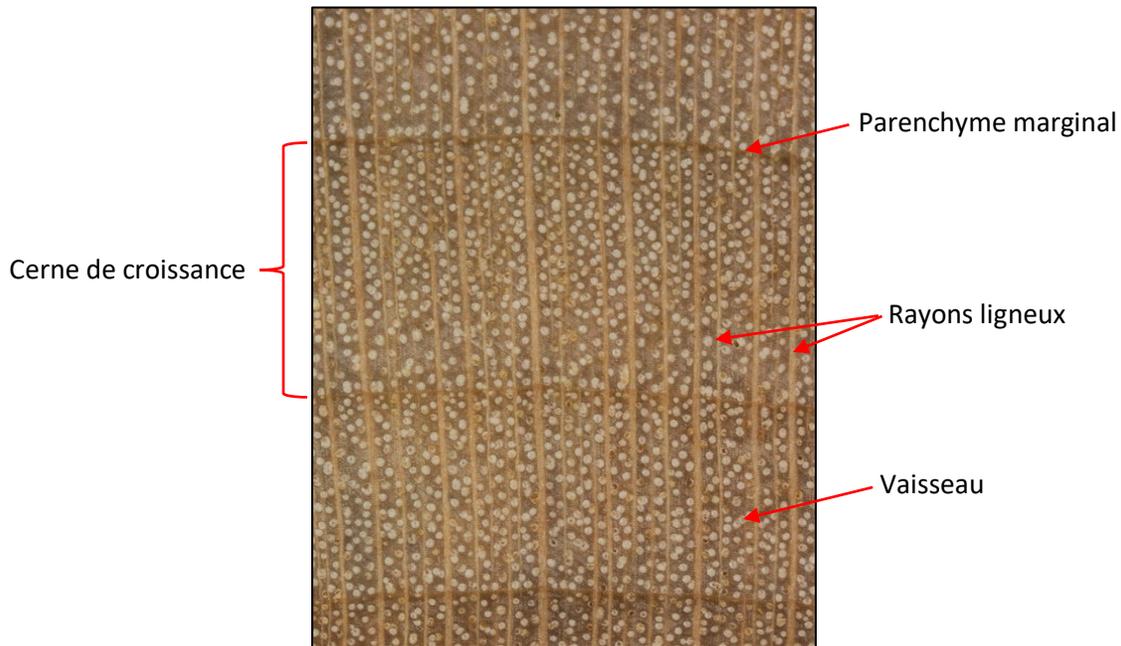


Figure 1.2.2 : Coupe transversale d'un érable rouge (*Acer rubrum* L.) comme exemple de bois à pores diffus (Meier, 2021a).

1.2.3.2 BOIS À ZONES POREUSES

Les bois à zones poreuses correspondent au deuxième type principal de bois que l'on peut retrouver chez les feuillus, notamment chez les frênes (*Fraxinus* spp.) et les chênes (*Quercus* spp.) (Wiedenhoef, 2013). Comme il est possible de l'observer sur la Figure 1.2.3, les bois appartenant à ce groupe sont caractérisés par des vaisseaux de diamètre beaucoup plus grand dans le bois initial que dans le bois final (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Wiedenhoef, 2013). De plus, les vaisseaux présents dans le bois initial sont disposés de sorte à prendre la forme d'un anneau créant ainsi une transition abrupte entre le bois initial et le bois final (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Wiedenhoef, 2013). Dans les régions tempérées, les arbres à zones poreuses expriment des réponses moins prononcées à la sécheresse que les bois à pores diffus, notamment au niveau de la croissance radiale et de la réponse stomatale (Bader *et al.*, 2022). Ainsi, en période de sécheresse, la meilleure tolérance à la sécheresse des espèces à zones poreuses leur permet de se maintenir plus longtemps dans des environnements plus secs (Bader *et al.*, 2022). À noter que Steppe & Lemeur (2007) ont montré que la capacité hydraulique des tissus du tronc des arbres responsable du stockage de l'eau est plus élevée chez les arbres à zones poreuses que chez les arbres à pores diffus.

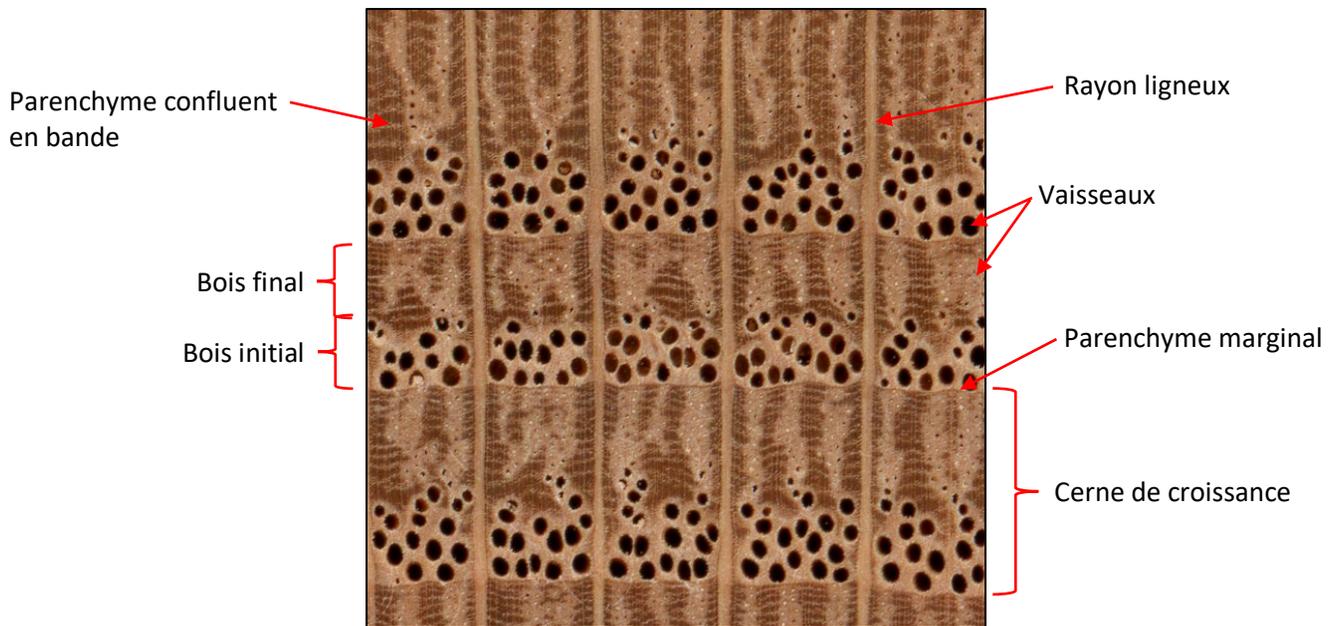


Figure 1.2.3 : Coupe transversale d'un chêne rouge (*Quercus rubra* L.) comme exemple de bois à zones poreuses (Meier, 2021b).

1.2.3.3 BOIS À TRACHÉIDES DES CONIFÈRES

Le bois des conifères est essentiellement constitué de structures appelées trachéides servant au transport de la sève brute et qui sont accompagnées, chez certaines espèces, de canaux résinifères (Figure 1.2.4) (Benabdallah *et al.*, 1996 ; Jourez, 2010 ; Wiedenhoef, 2013). Malgré leur rôle essentiel dans le transport de la sève brute, les trachéides sont généralement considérées comme des conduits relativement inefficaces par rapport aux cellules conductrices des feuillus (Wiedenhoef, 2013). Ceci est principalement dû au fait que la cavité centrale de ces structures, soit le lumen, est très étroite, mais aussi à cause de la résistance substantielle qu'ont leurs parois cellulaires face aux flux de l'eau dans le bois (Wiedenhoef, 2013). De plus, puisque les trachéides composent la majorité du bois et que le bois des conifères a généralement une densité très élevée, la capacité de stockage de l'aubier est réduite pour, par exemple, les photosynthétats et les métabolites (Patten *et al.*, 2010). Toutefois, la structure ainsi que la densité du bois des conifères semblent leur offrir un avantage sous des conditions de stress hydrique, dans des milieux froids et arides ou lorsque leur tronc est très haut et nécessite donc que l'eau soit transportée sur de plus longues distances (Patten *et al.*, 2010 ; Sperry *et al.*, 2006). Sous un climat plus chaud, les conifères semblent tout de même croître moins rapidement que les feuillus (Way & Oren, 2010). À noter que, pour atteindre des taux de croissance du xylème similaires aux feuillus, les conifères tendent à consommer le carbone plutôt que de l'emmagasiner (Zhang *et al.*, 2020).

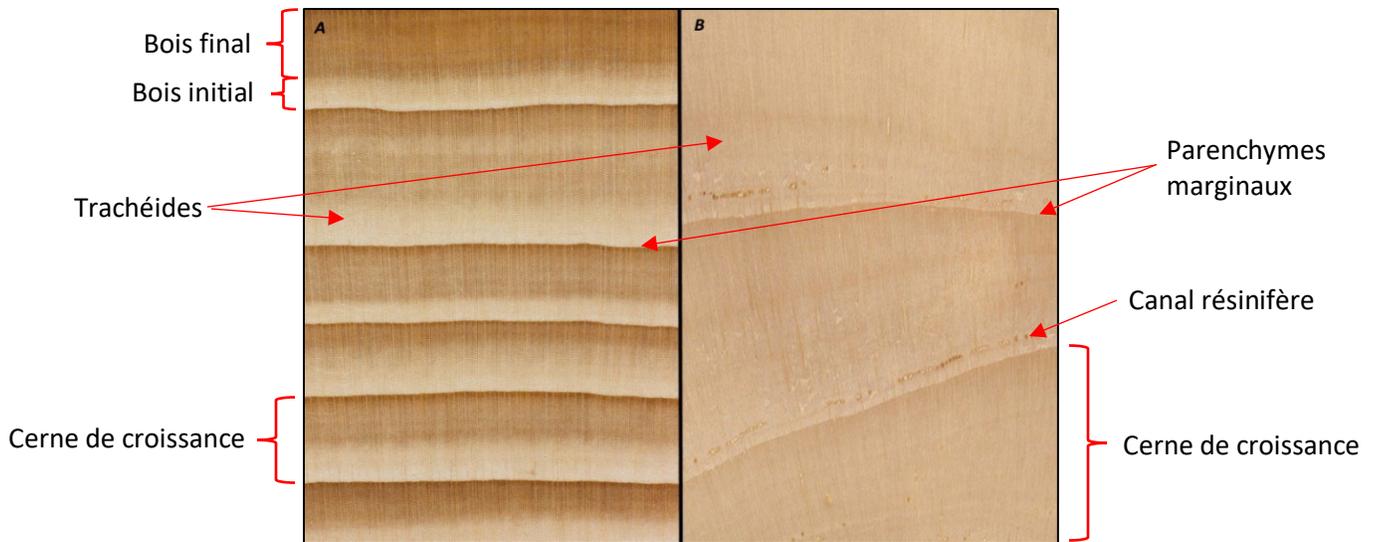


Figure 1.2.4 : Coupes transversales d'un sapin baumier (**A**) (Meier, 2022) et d'une épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss ; **B**) (Meier, 2017) comme exemples pour les bois à trachéides des conifères.

1.3 IMPORTANCE DE LA CROISSANCE RADIALE INTRA-ANNUELLE CHEZ LES ARBRES

Dans les écosystèmes forestiers, la croissance des arbres est le facteur le plus important afin de déterminer les processus de séquestration du carbone puisque la formation du bois est le processus biologique principal par lequel le carbone est alloué chez les arbres (Etzold *et al.*, 2021 ; Gheyret *et al.*, 2021). Ainsi, l'étude de la croissance radiale du tronc des arbres pourrait être utilisée afin d'estimer la productivité des forêts, lesquelles jouent un rôle capital dans les puits de carbone des écosystèmes terrestres qui sont eux-mêmes des composants majeurs du puits du carbone global (Tian *et al.*, 2024).

De plus, l'étude des dynamiques de la croissance radiale des troncs avec une résolution saisonnière est essentielle afin de comprendre la façon dont les forêts peuvent répondre aux changements climatiques (Etzold *et al.*, 2021). Cependant, les taux de croissance varient grandement entre les espèces (Gheyret *et al.*, 2021). Il a d'ailleurs été observé que, lors de la croissance, l'activité du cambium est directement contrainte par des conditions environnementales limitantes, en particulier sur de courts horizons temporels, tels que la température et le potentiel hydrique (Etzold *et al.*, 2021 ; Rumyantseva *et al.*, 2023).

Dans un autre ordre d'idées, à cause de la relation positive entre le développement des cernes de croissance des arbres et la productivité primaire brute, la croissance radiale des troncs pourrait aussi être utilisée afin d'estimer la productivité forestière (Tian *et al.*, 2024). Ainsi, avec l'augmentation des

températures globales et l'allongement possible des saisons de croissance dans les régions froides, il existe un potentiel pour l'augmentation des incréments radiaux annuels des troncs d'arbres (Babst *et al.*, 2014 ; Tian *et al.*, 2024). Cependant, cette relation complexe n'est pas linéaire due à l'influence de divers facteurs (déficit hydrique, respiration, etc.) pouvant influencer significativement les taux de croissance (Tian *et al.*, 2024 ; Trahan & Schubert, 2016 ; Ziaco *et al.*, 2018). Par exemple, les réponses des feuillus à pores diffus et des feuillus à zones poreuses face à la sécheresse sont caractérisées par différents facteurs et expriment différents niveaux de résistance ou de résilience. Cela dit, la perte de productivité de ces arbres reste relativement similaire, peu importe le groupe fonctionnel (Buttó *et al.*, 2021).

1.4 UTILISATION DES DENDROMÈTRES DE TRONC AFIN DE QUANTIFIER LA CROISSANCE RADIALE INTRA-ANNUELLE DES ARBRES

1.4.1 UTILISATION ET AVANTAGES DES DENDROMÈTRES DE TRONC

Le diamètre du tronc est l'une des caractéristiques des arbres les plus couramment mesurées et constitue la base des recensements forestiers ainsi que de la surveillance des forêts (Hermann *et al.*, 2016). Pour ce faire, les mesures prises à l'aide de dendromètres sont une alternative fréquemment utilisée à la place d'autres méthodes d'étude de la dynamique de croissance intra-annuelle des arbres étant plus invasives, laborieuses et chronophages (Miller *et al.*, 2022). De plus, les mesures dendrométriques sont un élément important pour la modélisation de la réponse et des performances des espèces arborescentes face aux changements climatiques puisque ces mesures fournissent des séries temporelles de la croissance composées du début et de la fin de la croissance ainsi que de la combinaison du rythme des fluctuations radiales liées à la quantité d'eau stockée dans les troncs et des taux de croissance saisonnière des arbres (Deslauriers *et al.*, 2007 ; Miller *et al.*, 2022). Cependant, les mesures dendrométriques récoltées se doivent d'être robustes, précises et reproductibles (Knüsel *et al.*, 2021).

Il existe deux types de dendromètres électroniques permettant de mesurer automatiquement le diamètre du tronc des arbres de façon continue et avec une haute résolution temporelle, soit le dendromètre à bande ou à câble ainsi que le dendromètre à point (Oogathoo, s. d.). Les dendromètres à bande ainsi que ceux à câble sont similaires dans leur fonctionnement et mesurent continuellement la tension exercée sur la bande ou le câble (Oogathoo, s. d.). De plus, contrairement aux dendromètres à point, ces deux types de dendromètres sont plus précis puisqu'ils permettent de prendre des mesures sur toute la circonférence du tronc sur lequel ils sont installés (Oogathoo, s. d.). Par ailleurs, les dendromètres à câble ainsi que ceux à point ont une résolution variant de 0,01 μm à 1 μm selon le modèle de l'enregistreur de données utilisé

(Ecomatik, 2019 ; Oogathoo, s. d.). Les dendromètres à bande, quant à eux, ont plutôt une résolution de 1 μm (Miller *et al.*, 2022 ; Oogathoo, s. d.). À noter que, dans le cas de certains modèles de dendromètres à point, la température n'a pas d'effet sur les mesures puisque l'expansion thermique est négligeable (Oogathoo, s. d. ; Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015).

1.4.2 LES DÉSAVANTAGES DE L'UTILISATION DES DENDROMÈTRES DE TRONC

Le traitement des mesures dendrométriques brutes obtenues sur le long terme pour les transformer en proxys physiologiquement significatifs peut se révéler difficile pour deux raisons principales (Knüsel *et al.*, 2021). La première est que, dû aux ajustements devant être pratiqués sur les appareils, à des pannes ou à des perturbations mécaniques externes, les mesures brutes contiennent souvent des valeurs aberrantes, des erreurs, des décalages ou des trous dans les données (Knüsel *et al.*, 2021). Ainsi, la correction et le nettoyage des données récoltées est un processus laborieux et non reproductible qui doit se faire manuellement (Knüsel *et al.*, 2021). Il est ainsi nécessaire d'utiliser des logiciels qui font le nettoyage des données tel que le paquet *treenetproc* à utiliser dans le logiciel *RStudio* (Haeni *et al.*, 2020 ; Oogathoo, s. d.).

La deuxième raison est que les changements de taille de la circonférence des troncs peuvent être divisés en deux composants, soit un composant réversible lié à l'eau et un composant irréversible induit par la croissance (Knüsel *et al.*, 2021). Les gonflements ainsi que les contractions des troncs sont dus à des changements dans le potentiel hydrique et la croissance radiale est due à la division cellulaire ainsi qu'à l'élargissement cellulaire à l'intérieur du cambium des troncs (Deslauriers *et al.*, 2007 ; Knüsel *et al.*, 2021).

De plus, il existe aussi des désavantages liés à l'utilisation de certains types de dendromètres électroniques. Pour les dendromètres à câble, il est nécessaire de réajuster la tension du câble lorsque celle-ci devient trop élevée et il faut aussi prendre en compte l'expansion thermique dudit câble (Ecomatik, 2019 ; Oogathoo, s. d.). Il est aussi nécessaire d'enfiler des petites billes sur le câble afin de diminuer la friction entre celui-ci et la surface du tronc ainsi que prendre en compte l'épaisseur du câble lors des calculs de la circonférence des troncs (Ecomatik, 2019 ; Oogathoo, s. d.).

Dans le cas des dendromètres à bande, ceux-ci sont insensibles aux petites variations provenant des troncs sur lesquelles ils sont posés (Oogathoo, s. d. ; Wang & Sammis, 2008). Aussi, il ne faut pas utiliser les mesures prises durant les trois premiers mois suivant l'installation de ces dendromètres à cause de

l'ajustement de leur bande pendant cette période (Keeland & Sharitz, 1993 ; Oogathoo, s. d.). D'ailleurs, les mesures récoltées doivent être corrigées par un facteur d'expansion thermique liée à la bande utilisée afin de considérer l'effet de la température (Gutiérrez *et al.*, 2011 ; Oogathoo, s. d.). Ce type de dendromètres oblige aussi à enlever une partie de l'écorce de l'arbre sur lequel il sera posé afin d'avoir une surface lisse avant d'installer la bande autour du tronc (Olivar *et al.*, 2014 ; Oogathoo, s. d.).

Dans le cas des dendromètres à point, une partie de l'écorce doit être enlevée lors de l'installation d'un appareil dans le but de réduire l'effet de l'expansion et du rétrécissement de l'écorce sur les mesures (Oogathoo, s. d. ; Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015). De plus, les barres devant être insérées dans l'arbre afin de fixer les dendromètres peuvent causer des plaies sur les troncs des arbres échantillonnés (Oogathoo, s. d.). Finalement, ce type de dendromètre ne prend les mesures que sur un ou deux endroits sur le tronc (Oogathoo, s. d.).

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE

Les changements climatiques ainsi que l'accroissement de la fréquence et de la sévérité des perturbations naturelles les accompagnant menacent de plus en plus la santé et la résilience des forêts au travers de changements graduels de leur fonctionnement et de leur structure (Boisvert-Marsh *et al.*, 2022 ; Bonsal *et al.*, 2019 ; Boulanger *et al.*, 2021 ; Cholet *et al.*, 2022 ; Logan *et al.*, 2011 ; Pappas *et al.*, 2022b ; Tei *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2019). Au Québec, il est prévu que les stress hydriques liés au réchauffement du climat ainsi qu'à la hausse de la demande évaporative vont grandement réduire la productivité des forêts tout en changeant dramatiquement leur composition d'ici la fin du 21^e siècle (Boulanger *et al.*, 2021 ; Pappas *et al.*, 2022b ; Périé *et al.*, 2014 ; Périé & de Blois, 2016). Les impacts potentiels de ces changements environnementaux sur les forêts québécoises, leur biodiversité et les services écosystémiques qu'elles rendent seront potentiellement importants (Auzel *et al.*, 2012 ; Berteaux *et al.*, 2010 ; Pappas *et al.*, 2022b). Toutefois, des variations régionales dans les réponses des forêts face aux changements climatiques sont attendues le long d'un gradient nord-sud (Huang *et al.*, 2010 ; Pappas *et al.*, 2022b). Ce sont les conditions climatiques spécifiques à chacune des régions qui dicteront la façon dont les écosystèmes forestiers du Québec vont évoluer. Les zones de transition seront les toutes premières à subir des effets et devraient être suivies en priorité. Les stratégies d'aménagement des forêts devront être adaptées au cas par cas, selon les impacts locaux prédits (Pappas *et al.*, 2022b). Les interactions globales de ces facteurs ainsi que leurs effets combinés sur les réponses des arbres dans leur environnement restent peu explorés dans les recherches actuelles (Soubeyrand *et al.*, 2024). Sans compter que les corrélations entre les caractéristiques de la saison de croissance, les taux de croissance radiale des arbres et les variables météorologiques ou hydrodynamiques ne sont actuellement pas bien comprises (Rumyantseva *et al.*, 2023). Ainsi, pour mieux comprendre et prédire les effets des changements climatiques, il est crucial de produire des données temporelles de haute précision qui sont représentatives des réponses des forêts en temps réel, notamment en ce qui a trait aux relations entre la saison de croissance, les taux de croissance radiale des arbres et les variables hydroclimatiques de l'air et du sol.

2.2 QUESTIONS GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE

Au vu de cette problématique, l'étude vise à répondre aux questions générales suivantes :

- (1) Comment la saison de croissance et les taux de croissance radiale des espèces arborescentes sont affectés par les aléas météorologiques et les conditions des sites dans une zone de transition, soit à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune ?
- (2) Quelles sont les espèces d'arbres ou les groupes d'espèces montrant la plus grande capacité d'adaptation en termes de croissance radiale face aux aléas météorologiques ?

2.3 OBJECTIF ET SOUS-OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Afin de répondre à ces questions, cette étude a pour principal objectif de caractériser la saison de croissance et de documenter les variations intra-annuelles des taux de croissance radiale de différentes espèces arborescentes face à des variations de la température et de la disponibilité de l'eau au cours de trois saisons de croissance complètes. Les arbres à l'étude sont répartis sur deux sites situés intentionnellement au sein d'une zone de transition, c'est-à-dire à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune. L'objectif se subdivise en quatre sous-objectifs. Le premier sous-objectif est de décrire le début, la fin et la longueur de la saison de croissance radiale des arbres étudiés. Le deuxième sous-objectif est d'estimer les taux de croissance radiale intra-annuelle du tronc de ces arbres. Le troisième sous-objectif est de déterminer quelles variables hydroclimatiques ainsi que quelles conditions biotiques et abiotiques liées aux sites ont le plus d'influence sur les taux de croissance radiale des arbres. Le quatrième sous-objectif est de classifier le niveau de sensibilité des espèces ou groupes d'espèces face aux aléas météorologiques.

2.4 HYPOTHÈSES

- (i) Dans les forêts tempérées, la hausse des températures et des stress hydriques devrait davantage affectée négativement la saison de croissance radiale (début, fin et longueur) des conifères que celle des feuillus.
- (ii) Dans les forêts tempérées, l'augmentation de la température et la diminution de la disponibilité de l'eau devraient faire en sorte que la croissance radiale des conifères soit plus faible que celle des feuillus.

- (iii) Dans les forêts tempérées, les aléas météorologiques et les conditions des sites devraient affecter similairement la réponse des arbres à pores diffus et de ceux à zones poreuses indépendamment du site sur lequel ils se trouvent.
- (iv) Les espèces situées à la limite sud de leur aire de répartition devraient avoir une croissance radiale plus faible que les espèces situées à la limite nord de leur aire de répartition.
- (v) Les variables liées à l'eau devraient avoir plus d'impact sur la croissance radiale que les variables physiques ou que celles liées à la température.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 SITES D'ÉTUDE

L'étude a été menée dans deux sites du sud du Québec, au sein d'une zone de transition, soit à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune (Figure 3.1.1). Le premier site est situé dans la région administrative de Lanaudière sur le territoire de la municipalité de Sainte-Émélie-de-l'Énergie (STE). Plus spécifiquement, ce site de conservation appartient à la Fiducie de conservation des écosystèmes de Lanaudière (FiCEL) et est situé aux coordonnées 46° 22' 08,3994" N et 73° 41' 06" O. Le deuxième site est, quant à lui, situé sur les terrains de la Station de biologie des Laurentides (SBL) de l'Université de Montréal (45° 59' 13,2" N et 74° 00' 17,9994" O) sur le territoire de la municipalité de Saint-Hippolyte dans le sud de la région administrative des Laurentides. Ces deux sites expérimentaux ont été choisis parce que leur composition forestière est typiquement représentative des peuplements forestiers du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune. Ceux-ci contiennent les principales espèces d'arbres présentes dans le Québec méridional et, plus particulièrement, celles présentes dans le sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'est. De plus, ces peuplements forestiers se trouvent à la marge entre la forêt tempérée nordique et la forêt boréale, ce qui laisse place à une mosaïque d'espèces et de peuplements influencée par le régime thermique le long des versants ainsi que par le drainage des sols.

Parce que ces deux sites de la sous-zone de la forêt décidue se trouvent à proximité de la limite méridionale de la sous-zone de la forêt mixte représentée par le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, la mosaïque d'espèces arborescentes composant les peuplements forestiers de ces deux sites est dominée par l'érable à sucre, l'érable rouge et le hêtre à grandes feuilles bien que, à la limite sud-est du site SBL, plusieurs zones dominées par le chêne rouge sont présentes (Bélanger *et al.*, 2004 ; Bélanger *et al.*, 2012 ; Bélanger *et al.*, 2021 ; FiCEL, s. d. ; Lebel-Desrosiers, 2021 ; Pappas *et al.*, 2022a ; Pappas *et al.*, 2022b). Les autres espèces végétales majeures composant la strate arborescente de ces sites incluent le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata* Michx.), le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.), le bouleau jaune, le sapin baumier et le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) (Bélanger *et al.*, 2012 ; Bélanger *et al.*, 2021 ; Collin *et al.*, 2017 ; Collin *et al.*, 2018 ; FiCEL, s. d. ; Pappas *et al.*, 2022a ; Pappas *et al.*, 2022b). Quelques frênes noirs (*Fraxinus nigra* Marsh.) sont aussi présents sur les deux sites (FiCEL, s. d. ; Savage, 2001). À noter que, de par son emplacement plus nordique, la

communauté arborescente du site STE est caractérisée par une plus grande proportion d'espèces conifériennes que celle du site SBL. Une partie du site STE est d'ailleurs dominée par un peuplement résineux principalement composé de thuyas occidentaux et d'épinettes blanches (FICEL, s. d.).

Pour ce qui est du sous-étage forestier, au site STE, celui-ci est caractérisé, en bas de pente, par une strate herbacée composée de fougères (*Osmunda* spp.), de dentaires à deux feuilles (*Cardamine diphylla* (Michx.) Alph. Wood) et de sanguinaires du Canada (*Sanguinaria canadensis* L.) (FICEL, s. d.). En milieu de pente, le sous-étage forestier du site STE est plutôt caractérisé par une strate herbacée absente ou composée, entre autres, de quatre-temps (*Cornus canadensis* L.), de clintonies boréales (*Clintonia borealis* (Aiton) Raf.) et de maïanthèmes du Canada (*Maianthemum canadense* Desf.) (FICEL, s. d.). Finalement, en haut de pente, le sous-étage forestier du site STE est caractérisé par une strate arbustive dominée par la viorne à feuilles d'aulne (*Viburnum lantanoïdes* Michx.) et le noisetier à long bec (*Corylus cornuta* Marsh.) ainsi que par un parterre composé majoritairement d'érythrones d'Amérique (*Erythronium americanum* Ker-Gawl.), de trilles rouges (*Trillium erectum* L.) et d'uvulaires à feuilles sessiles (*Uvularia sessilifolia* L.) (FICEL, s. d.). Au site SBL, le sous-étage forestier est, quant à lui, majoritairement composé d'érables de Pennsylvanie (*Acer pensylvanicum* L.), de viornes à feuilles d'aulne, de dryoptères (*Dryopteris* spp.) et de lycopes (*Lycopodium* spp.) (Pappas *et al.*, 2022b ; Savage, 2001).

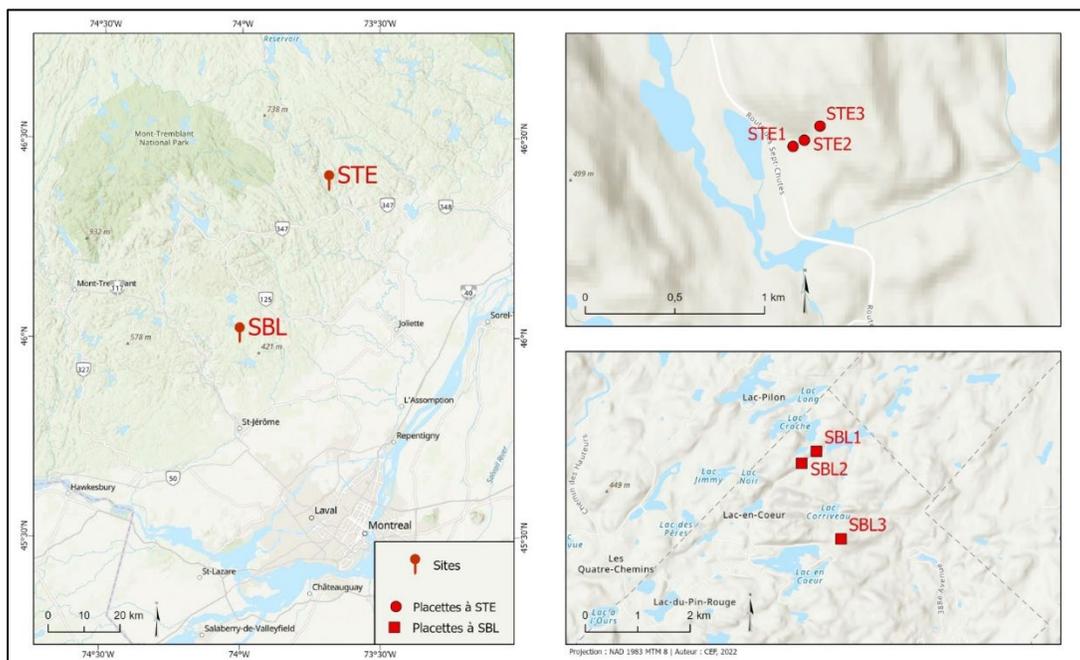


Figure 3.1.1 : Cartes de l'emplacement des deux sites d'échantillonnage (à gauche) et des placettes expérimentales (à droite).

Le site STE est caractérisé par une température moyenne annuelle de 3,3 °C ainsi que par une moyenne de précipitations totales annuelles de 1093 mm, dont environ le tiers tombe sous forme de neige (Pappas *et al.*, 2022a). La densité moyenne des espèces arborescentes dominantes (celles ayant un diamètre à hauteur de poitrine supérieur ou égal à 5 cm) est de 1690 troncs par hectare et la surface terrière moyenne de ces dernières est de 42 m²/ha (Pappas *et al.*, 2022a). Le site SBL, quant à lui, est caractérisé par une température moyenne annuelle située entre 4,9 °C et 5,5 °C (Bélanger & Chaput-Richard, 2023 ; Pappas *et al.*, 2022b). Ce site est aussi caractérisé par une moyenne de précipitations totales annuelles située entre 1050 mm et 1270 mm avec la même quantité tombant sous forme de neige qu'au site STE (Bélanger & Chaput-Richard, 2023 ; Pappas *et al.*, 2022b). L'âge moyen des peuplements forestiers est de 80 ans, la densité moyenne des espèces arborescentes dominantes (celles ayant un diamètre à hauteur de poitrine supérieur ou égal à 5 cm) est de 1060 troncs par hectare et la surface terrière moyenne de ces dernières est de 33 m²/ha (Pappas *et al.*, 2022b). Ainsi, de par ces différences climatiques majeures, ces deux sites sont caractérisés par deux isothermes différentes. Dans le cadre de cette étude, ils sont utilisés comme proxy pour les scénarios d'augmentation de la température pour les espèces se trouvant sur les deux sites, où le site STE correspond à un scénario plus froid et humide alors que le site SBL correspond à un scénario plus chaud et sec.

Les sols des deux sites se sont développés à partir de tills et de dépôts fluvioglaciaires sablonneux contenant une petite fraction limoneuse (Bélanger *et al.*, 2004 ; Bélanger *et al.*, 2012 ; Bélanger *et al.*, 2021 ; Collin *et al.*, 2017 ; Pappas *et al.*, 2022a ; Pappas *et al.*, 2022b). À noter que, pour le site SBL, ces dépôts glaciaires sont majoritairement composés d'anorthosite ainsi que de roches felsiques précambriennes issues du Bouclier canadien (Bélanger *et al.*, 2004 ; Bélanger *et al.*, 2012 ; Bélanger *et al.*, 2021). Pour le site STE, ces dépôts glaciaires reposent sur un socle rocheux précambrien composé, en bas de pente, de jotunite et de diorite ainsi que, en milieu et haut de pente, de gneiss oreillé mangéritique et charnockitique (MRNF, s. d.). Avec sa composante d'anorthosite, le sol du site SBL est donc plus riche en éléments basiques, notamment en calcium, que le site STE. La litière forestière est composée d'un humus de forme moder de 5 cm à 10 cm d'épaisseur et la majorité des sols sont de minces podzols ferro-humiques orthiques (PFH.OR) ou humo-ferriques orthiques (PHF.OR) généralement bien drainés (Bélanger *et al.*, 2004 ; Bélanger *et al.*, 2012 ; Bélanger *et al.*, 2021 ; Collin *et al.*, 2017 ; Collin *et al.*, 2018 ; Pappas *et al.*, 2022a ; Pappas *et al.*, 2022b).

Chacun des deux sites a été subdivisés en trois placettes expérimentales, soit STE1, STE2 et STE3 pour le site STE (Figure 3.1.2) ainsi que SBL1, SBL2 et SBL3 pour le site SBL (Figure 3.1.3). Au site STE, les placettes sont situées à différentes élévations afin de prendre en compte l'influence des gradients topographiques à l'échelle locale sur la composition végétale ainsi que pour prendre en compte l'hétérogénéité de la composition des peuplements forestiers. Par conséquent, la placette STE1 est située en bas de pente, la placette STE2 est située en milieu de pente et la placette STE3 est située en haut de pente. Pour chaque placette expérimentale, à l'exception des placettes SBL1 et SBL2, huit arbres ont été suivis de 2020 à 2023. Dans le cas de la placette SBL1, ce sont 14 arbres qui ont été suivis alors que, pour la placette SBL2, ce sont plutôt 16 arbres qui ont été suivis. Au total, ce sont 62 individus appartenant à 11 espèces d'arbres qui ont été étudiés durant cette étude. Le Tableau 3.1.1 montre la distribution des individus des différentes espèces étudiées selon la placette expérimentale. À noter que certains individus sont morts durant l'étude ou bien des équipements ont été endommagés par la neige, la glace ainsi que par les animaux et n'ont pas été remplacés à cause des coûts élevés de ces équipements. Par conséquent, les données ne sont pas disponibles pendant trois ans pour tous ces arbres. Le Tableau 3.1.2 montre le type d'anatomie du bois que possède chacune des espèces étudiées ainsi que la position des sites expérimentaux dans l'aire de répartition de ces dernières. Au total, nous avons étudiés six espèces à pores diffus, deux espèces à zones poreuses et trois espèces à trachéides (conifères).

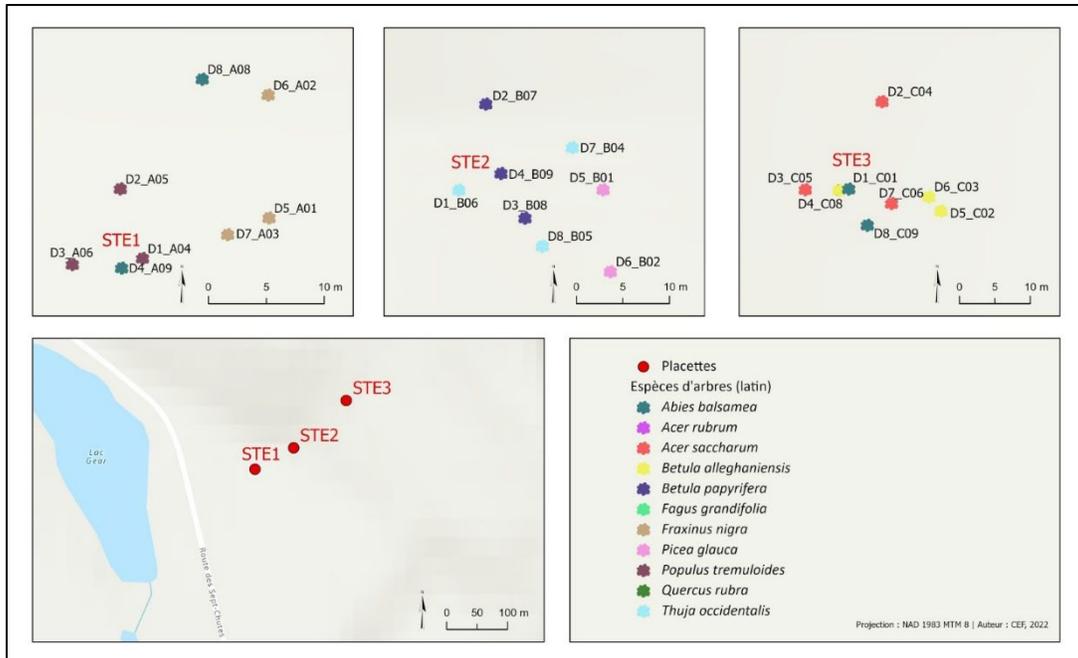


Figure 3.1.2 : Cartes de l'emplacement des placettes expérimentales ainsi que des arbres et espèces échantillonnés au site STE.

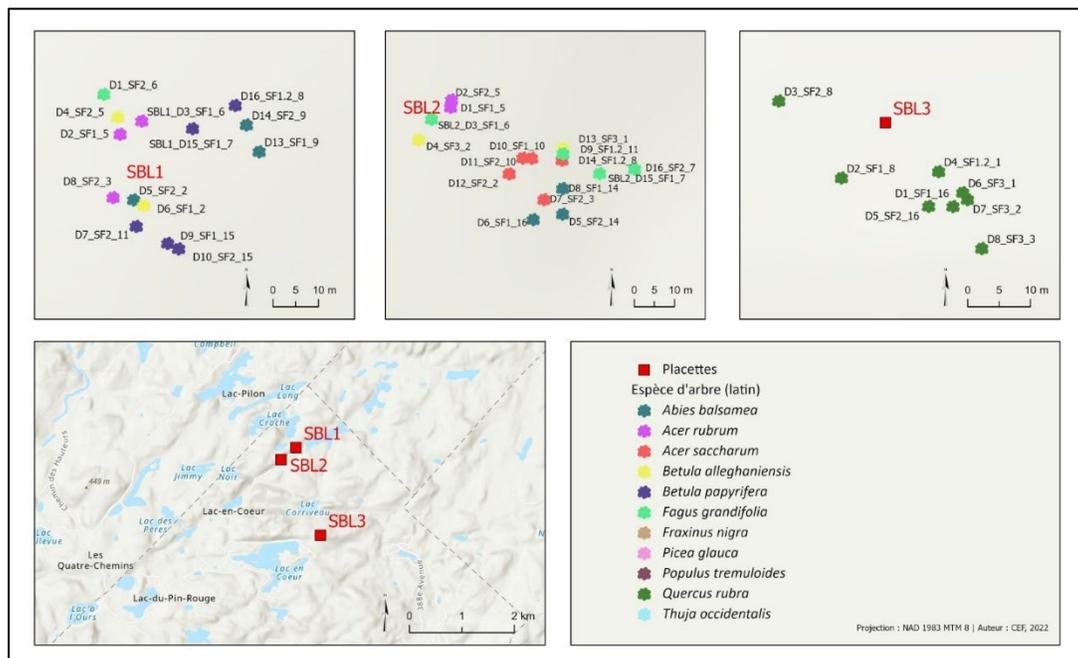


Figure 3.1.3 : Cartes de l'emplacement des placettes expérimentales ainsi que des arbres et espèces échantillonnés au site SBL.

Tableau 3.1.1 : Les différentes espèces d'arbres étudiées et leurs nombres par placette expérimentale.

Espèces	STE1	STE2	STE3	SBL1	SBL2	SBL3	Total
<i>Abies balsamea</i>	2	0	2	3	3	0	10
<i>Acer rubrum</i>	0	0	0	3	2	0	5
<i>Acer saccharum</i>	0	0	3	0	5	0	8
<i>Betula alleghaniensis</i>	0	0	3	2	2	0	7
<i>Betula papyrifera</i>	0	3	0	5	0	0	8
<i>Fagus grandifolia</i>	0	0	0	1	4	0	5
<i>Fraxinus nigra</i>	3	0	0	0	0	0	3
<i>Picea glauca</i>	0	2	0	0	0	0	2
<i>Populus tremuloides</i>	3	0	0	0	0	0	3
<i>Quercus rubra</i>	0	0	0	0	0	8	8
<i>Thuja occidentalis</i>	0	3	0	0	0	0	3
Total	8	8	8	14	16	8	62

Tableau 3.1.2 : Anatomie du bois selon l'espèce d'arbre étudiée et position des sites dans leur aire de répartition.

Espèces	Anatomie du bois	Position des sites dans l'aire de répartition
<i>Abies balsamea</i>	Trachéides (Conifère)	Sud (RNCan, 2022a)
<i>Acer rubrum</i>	Pores diffus	Nord (RNCan, 2022b)
<i>Acer saccharum</i>	Pores diffus	Nord (RNCan, 2022c)
<i>Betula alleghaniensis</i>	Pores diffus	Centre (RNCan, 2022d)
<i>Betula papyrifera</i>	Pores diffus	Sud (RNCan, 2022e)
<i>Fagus grandifolia</i>	Pores diffus	Nord (RNCan, 2022f)
<i>Fraxinus nigra</i>	Zones poreuses	Centre (RNCan, 2022g)
<i>Picea glauca</i>	Trachéides (Conifère)	Sud (RNCan, 2022h)
<i>Populus tremuloides</i>	Pores diffus	Sud (RNCan, 2022i)
<i>Quercus rubra</i>	Zones poreuses	Nord (RNCan, 2022j)
<i>Thuja occidentalis</i>	Trachéides (Conifère)	Sud (RNCan, 2022k)

3.2 VARIABLES ET PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE

Afin de mener à bien cette étude, nous avons fait le suivi de plusieurs variables. Ces dernières peuvent être divisées en deux catégories, soit les variables ayant été mesurées de façon continue et celles ayant été récoltées ponctuellement. Les variables mesurées de façon continue sont les micro-variations du diamètre du tronc des arbres étudiés ($[\mu\text{m}]$), la température de l'air (T_{air} ; $[\text{°C}]$) et du sol (T_{sol} ; $[\text{°C}]$), le nombre de degrés-jours de croissance de l'air (DJC_{air} ; $[\text{DJC}]$) avec comme températures de base (T_{base} ; $[\text{°C}]$) 10 °C, 15 °C et 20 °C, le nombre de degrés-jours de croissance du sol (DJC_{sol} ; $[\text{DJC}]$) avec comme températures de base (T_{base} ; $[\text{°C}]$) 5 °C, 10 °C et 15 °C, le potentiel hydrique du sol (SMS ; $[\text{kPa}]$), le contenu volumétrique en eau du sol (VWC ; $[\%]$), l'humidité relative de l'air (RH ; $[\%]$) ainsi que le déficit de pression de vapeur (VPD ; $[\text{kPa}]$). Les variables récoltées ponctuellement correspondent, quant à elles, aux espèces des arbres suivis, à l'élévation des arbres suivis ($[\text{m}]$), à l'anatomie du bois de ces espèces et au diamètre à hauteur de poitrine (DHP ; $[\text{cm}]$) initial des arbres échantillonnés. À noter que la densité moyenne des arbres ($[\text{troncs/ha}]$), la surface terrière ($[\text{m}^2/\text{ha}]$) ainsi que le type de sol des sites d'étude sont d'autres variables susceptibles d'influencer nos résultats qui ont été prises en compte lors de l'étude.

En plus de ces variables, cinq paramètres relatifs à la croissance radiale des arbres suivis ont été calculés lors de l'étude. Ceux-ci sont les dates de début (*gro_start*) et de fin (*gro_end*) de la saison de croissance des arbres suivis ($[\text{dates juliennes}]$), la durée de la saison de croissance de ces derniers (*nbr_day* ; $[\text{jours}]$), leur croissance radiale relative annuelle (CRRA ; $[\%]$) et leur taux absolu de croissance radiale annuelle (TACRA ; $[\text{mm/jour}]$).

3.3 ÉCHANTILLONNAGE ET ÉQUIPEMENT UTILISÉ

Lors de la sélection des arbres, le DHP initial (mesure prise à 1,3 m au-dessus du sol) de ces derniers a été mesuré à l'aide d'un ruban forestier. Le DHP de chacun des arbres échantillonnés a de nouveau été mesuré au début des saisons de croissance de 2022 et de 2023. Avec ces mesures, les arbres échantillonnés ont été catégorisés en huit classes de DHP, soit la classe 1 ($\text{DHP} < 15 \text{ cm}$), la classe 2 (DHP entre 15 cm et 20 cm), la classe 3 (DHP entre 20,1 cm et 30 cm), la classe 4 (DHP entre 30,1 cm et 40 cm), la classe 5 (DHP entre 40,1 cm et 50 cm), la classe 6 (DHP entre 50,1 cm et 60 cm), la classe 7 (DHP entre 60,1 cm et 65 cm) et la classe 8 ($\text{DHP} > 65 \text{ cm}$). L'élévation (par rapport au niveau de la mer) de chaque arbre sélectionné a été mesurée à l'aide d'un GPS.

Afin de mesurer les micro-variations du diamètre du tronc des arbres étudiés, des dendromètres de tronc à câble mesurant la force de pression radiale de façon continue (*Type DC3 Circumference Dendrometers* ; Ecomatik ; Munich, Allemagne) ont été installés sur chacun des individus sélectionnés. Ces derniers permettent de mesurer des micro-variations de l'ordre du micromètre (Ecomatik, 2019 ; Oogathoo, s. d.). Le câble utilisé est fabriqué avec un alliage d'acier inoxydable et d'aluminium, ce qui lui procure un coefficient d'expansion thermique inférieure à $1,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (Ecomatik, 2019). La Figure 3.3.1 montre un exemple d'installation d'un de ces dendromètres. Les mesures collectées par ces dendromètres ont été enregistrées toutes les 30 minutes. Les données récoltées par ces dendromètres correspondent à une période allant du 04 juin 2020 jusqu'au 24 octobre 2023 pour la majorité des arbres suivis. Cependant, dans le cas des huit chênes rouges de la placette SBL3, les dendromètres n'ont été installés qu'à partir de la mi-mai 2021.



Figure 3.3.1 : Exemple d'installation d'un *Type DC3 Circumference Dendrometer* dans la placette STE1 sur un frêne noir.

De plus, dans chaque placette du site STE, une station météorologique (*WatchDog 2550 Weather Station* ; Spectrum Technologies, Inc. ; Aurora, États-Unis) ainsi que deux microstations (*WatchDog 1650 Micro Stations* ; Spectrum Technologies, Inc.) équipées de capteurs mesurant la teneur volumétrique en eau du sol (*WatchDog WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensors* ; Spectrum Technologies, Inc.), le potentiel hydrique du sol (*WatchDog Watermark Soil Moisture Sensors* ; Spectrum Technologies, Inc.) et la température du sol de façon continue (*WatchDog External Temperature Sensors* ; Spectrum Technologies,

Inc.) ont été installées. Par placette expérimentale, il y a donc un total de trois *WatchDog WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensors* (WS), trois *WatchDog Watermark Soil Moisture Sensors* (WM) et deux *WatchDog External Temperature Sensors* (TS). Les sondes pédologiques ont été enterrées à environ 10 cm de profondeur. À noter que les WS mesurent le potentiel hydrique du sol selon un gradient allant de 0 kPa (teneur en eau élevée) à 200 kPa (teneur en eau très faible). Les mêmes équipements ont été mis en place dans les trois placettes du site SBL pour suivre les conditions hydroclimatiques du sol, alors qu'une seule station météorologique complète (*Automatic Weather Station* ; Campbell Scientific Canada ; Edmonton, Canada) est installée sur une tour dépassant le houppier des arbres (25 m) à proximité des laboratoires et résidences de la station. À noter que, pour le site SBL, les sondes WM n'ont été installées que sur des stations situées en périphéries des placettes SBL1 (stations P6 et P8) et SBL2 (stations P14 et P15). Les stations installées directement dans les trois placettes du site SBL n'étaient équipées que de sondes TS et WS. Le Tableau 3.3.1 résume la disposition des sondes utilisées pour les sols.

La Figure 3.3.2 montre le schéma d'installation des différentes capsules sur les microstations du site STE et la Figure 3.3.3 montre un exemple d'une des *WatchDog 1650 Micro Stations* installées au site STE. Les stations météorologiques mesurent notamment l'humidité relative de l'air et la température de l'air. Les différentes stations ont été programmées afin de saisir les données toutes les 60 minutes. À noter que les stations mesurant les paramètres du sol ont été installées de façon à ce que l'une soit plus haute dans la pente que l'autre lorsque possible.

Les stations météorologiques ainsi que les microstations ont récolté des données durant une période allant du 16 juin 2021 jusqu'au 23 octobre 2023 au site STE. À noter que, pour l'ensemble de l'année 2020, les données météorologiques (température de l'air et humidité relative de l'air) et la température du sol du site STE ont été simulées à l'aide du modèle *BioSim 11* (Régnière *et al.*, 2017). Au site SBL, les données récoltées par les microstations correspondent à une période allant du 04 juin 2020 jusqu'au 24 octobre 2023. À noter que, pour compléter l'année 2020, la température du sol du site SBL a été simulée à l'aide du modèle *BioSim 11* (Régnière *et al.*, 2017). Pour la station météorologique, elle a produite des données correspondante à la période allant du 28 avril 2020 jusqu'au 12 décembre 2023.

Tableau 3.3.1 : Dispositions des sondes utilisées pour mesurer les variables du sol selon les placettes et les sites.

Sites	Placettes	Nom de la station	Ports de la station				Notes
			A	B	C	D	
STE	STE1	A	WM	WM	WS	TS	
		B	WM	WS	WS	TS	
	STE2	A	WM	WM	WS	TS	
		B	WM	WS	WS	TS	
	STE3	A	WM	WM	WS	TS	
		B	WM	WS	WS	TS	
SBL	SBL1	Bloc1	TS	TS	WS	WS	
		Bloc2	TS	TS	WS	WS	
		P6	TS	TS	WM	WM	Situées en périphérie et seules les sondes WS ont été utilisées
		P8	TS	TS	WM	WM	Situées en périphérie et seules les sondes WS ont été utilisées
	SBL2	Bloc3	TS	TS	WS	WS	
		Bloc4	TS	TS	WS	WS	
		P14	TS	TS	WM	WM	Situées en périphérie et seules les sondes WS ont été utilisées
		P15	TS	TS	WM	WM	Situées en périphérie et seules les sondes WS ont été utilisées
	SBL3	Bloc5	TS	TS	WS	WS	
		Bloc6	TS	TS	WS	WS	

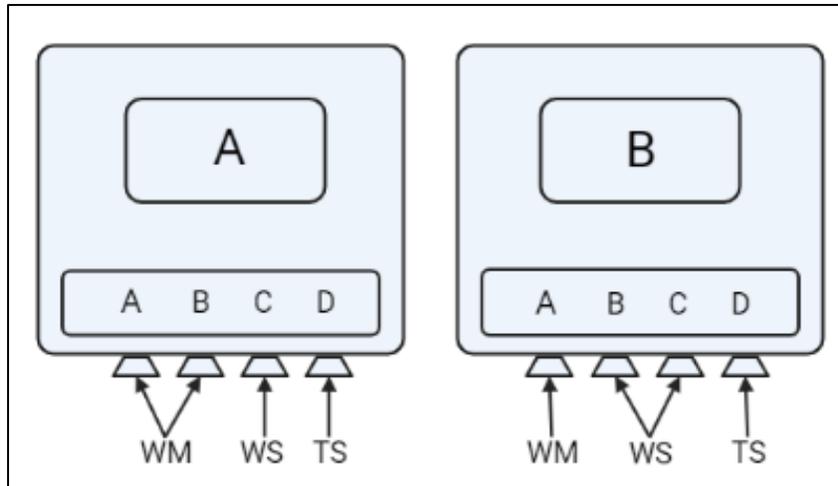


Figure 3.3.2 : Schéma d'installation des différentes sondes sur les *WatchDog 1650 Micro Stations* pour les placettes expérimentales du site STE. Les microstations A sont équipées de deux *WatchDog Watermark Soil Moisture Sensors* (WM ; [%]), une *WatchDog WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensor* (WS ; [kPa]) et une *WatchDog External Temperature Sensor* (TS ; [°C]). Les microstations B sont équipées d'une WM ([%]), deux WS ([kPa]) et une TS ([°C]).



Figure 3.3.3 : Exemple d'installation d'une microstation sur le sol de la placette STE2.

À noter que, les sondes *WatchDog Watermark Soil Moisture Sensors* utilisées afin de mesurer le potentiel hydrique du sol sont calibrées pour des températures de 70 °F (Spectrum Technologies, Inc., s. d.). Par conséquent, les données récoltées ont dû être ajustées en réduisant la valeur du potentiel hydrique de

1 % pour chaque degré supérieur à 70 °F ou en l'augmentant de 1 % pour chaque degré inférieur à 70 °F (Spectrum Technologies, Inc., s. d.). Donc, selon la formule suivante :

$$SMS_{aj} = SMS_m - (0,01 * SMS_m) * \left(T_{sol} - \frac{(70 \text{ °F} - 32)}{1,8} \right)$$

où SMS_{aj} est le potentiel hydrique du sol ajusté ([kPa]), SMS_m est le potentiel hydrique du sol mesuré ([kPa]) et T_{sol} est la température du sol ([°C]) (Spectrum Technologies, Inc., s. d.). À noter que $(70 \text{ °F} - 32)/1,8$ est la partie de la formule servant à convertir les degrés Fahrenheit (°F) en degrés Celsius (°C).

Le VPD pour les deux sites a été calculé en faisant la différence entre la pression de vapeur à saturation (VP_{sat}) et la pression de vapeur de l'air (VP_{air}), soit :

$$VPD = VP_{sat} - VP_{air}$$

où VPD est le déficit de pression de vapeur ([kPa]), VP_{sat} est la pression de vapeur à saturation ([kPa]) et VP_{air} est la pression de vapeur de l'air ([kPa]) (Ramos-Fernández *et al.*, 2016).

Afin de calculer les valeurs de VP_{sat} , l'équation suivante a été utilisée :

$$VP_{sat} = \frac{(610,7 * 10^{(7,5 * T_{air} / (237,3 + T_{air}))})}{1000}$$

où VP_{sat} est la pression de vapeur à saturation ([kPa]) et T_{air} est la température de l'air ([°C]) (Ramos-Fernández *et al.*, 2016).

Afin de calculer les valeurs de VP_{air} , l'équation suivante a été utilisée :

$$VP_{air} = \frac{(610,7 * 10^{(7,5 * T_{air} / (237,3 + T_{air}))})}{1000} * \frac{RH}{100}$$

où VP_{air} est la pression de vapeur de l'air ([kPa]), T_{air} est la température de l'air ([°C]) et RH est l'humidité relative de l'air ([%]) (Ramos-Fernández *et al.*, 2016).

Pour chaque saison de croissance, le nombre de DJC_{air} et de DJC_{sol} a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$DJC = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} - T_{base}$$

où T_{max} est la température maximale de la journée ([°C]), T_{min} est la température minimale de la journée ([°C]) et T_{base} est la température de base ([°C]). De plus, lorsque $(T_{max} + T_{min})/2 < T_{base}$, alors $(T_{max} + T_{min})/2 = T_{base}$ (AAC, s. d. ; Prentice *et al.*, 1992). À noter que, pour chaque année, le nombre de DJC_{air} et de DJC_{sol} a été calculé depuis la date de début moyenne de la saison de croissance jusqu'à la date moyenne de fin de la saison de croissance.

3.4 TRAITEMENTS DES DONNÉES RÉCOLTÉES

Dans le cadre de cette étude, le traitement de l'ensemble des données récoltées a été effectué à l'aide du logiciel *RStudio* en version 4.0.5 (RStudio Team, 2020) qui utilise le langage de programmation *R*. Les seules exceptions sont les données issues des dendromètres qui ont été préalablement récupérées et traitées via le logiciel *HOBOWare* en version 3.7.14 (Onset Computer Corporation, 2018) avant d'être analysées avec *RStudio*. Une fois dans *RStudio*, les données continues brutes issues des dendromètres ont été transformées afin d'obtenir les circonférences du tronc des différents arbres pour chaque temps *i*. Pour y parvenir, l'équation suivante a été utilisée :

$$C_i = 2 * \left(\pi * R_0 - R_0 * \cos^{-1} \left(\frac{R_0}{(R_0 + 128 - V_0)} \right) + \sqrt{(R_0 + 128 - V_0)^2 - R_0^2} + R_{i-1} \right) * \cos^{-1} \left(\frac{R_{i-1}}{(R_{i-1} + 128 - V_i)} \right) - \sqrt{(R_{i-1} + 128 - V_i)^2 - R_{i-1}^2}$$

où C_i est la circonférence du tronc au temps *i* ([mm]), R₀ est le rayon initial du tronc de l'arbre ([mm]), V₀ est la première donnée brute valable issue du dendromètre ([mm]), R_{i-1} est le rayon du tronc de l'arbre au temps *i-1* ([mm]) et V_i est la valeur brute issue du dendromètre au temps *i* ([mm]) (Ecomatik, 2019).

À noter que R₀ a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$R_0 = C_0 / \pi / 2$$

où R_0 est le rayon initial du tronc ([mm]) et C_0 est la circonférence initiale du tronc ([mm]) (Ecomatik, 2019).

Une fois que les circonférences à chaque temps i du tronc de chaque arbre ont été calculées, les données ont été analysées dans *RStudio* à l'aide de la fonction *grow_seas* de *treenetproc* (Haeni *et al.*, 2020 ; Knüsel *et al.*, 2021 ; Wickham *et al.*, 2019) afin de calculer les dates de début et de fin de la saison de croissance de chacun des arbres étudiés comme pour l'exemple présenté à la Figure 3.5.1. À l'aide de ces données, les taux absolus de croissance radiale annuelle, les croissances radiales relatives annuelles et la durée des saisons de croissance ont pu être calculés.

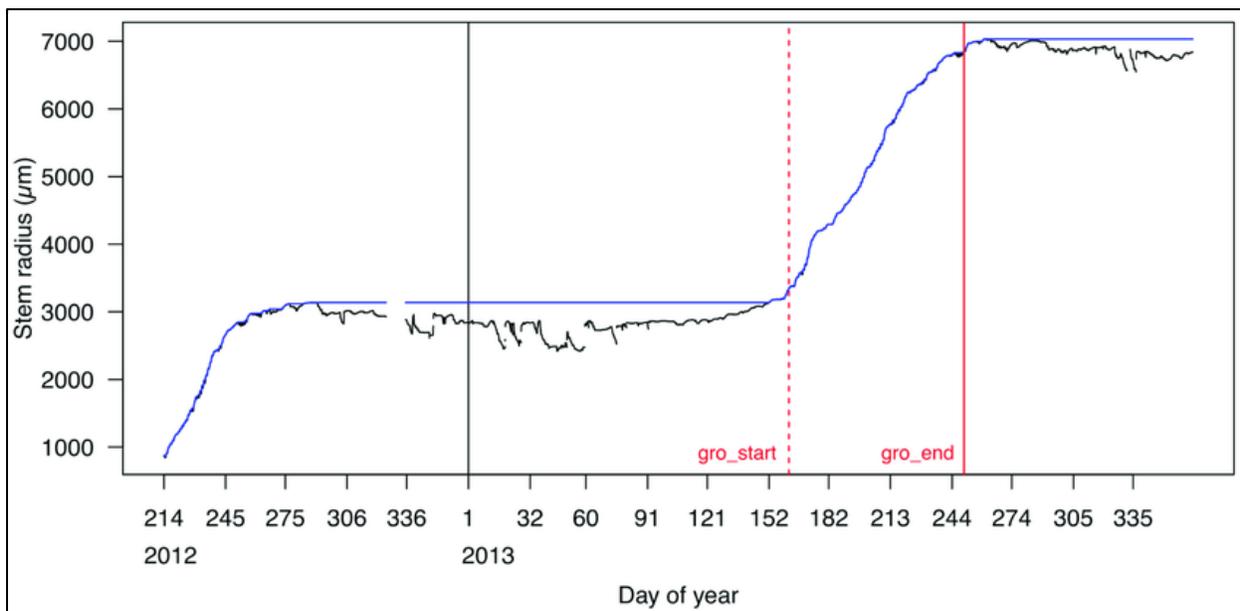


Figure 3.4.1 : Exemple de calcul des dates de début (*gro_start* ; ligne pointillée rouge) et de fin (*gro_end* ; ligne pleine rouge) de la saison de croissance d'un arbre en utilisant la fonction *grow_seas* de *treenetproc* avec une incertitude de 5 % (*tol_seas* = 0,05) (Knüsel *et al.*, 2021).

L'équation utilisée afin de calculer la durée de la saison de croissance d'un arbre était la suivante :

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

où Δt est la durée de la saison de croissance d'un arbre ([jours]), t_2 est la date julienne de la fin de la saison de croissance de l'arbre ([jours]) et t_1 est la date julienne du début de la saison de croissance de l'arbre ([jours]).

À noter que *treenetproc* nécessite plus d'un an et demi de données dendrométriques afin de pouvoir déterminer le début et la fin de la saison de croissance puisque le calcul dépend des données de l'année précédente (Haeni *et al.*, 2020 ; Knüsel *et al.*, 2021 ; Wickham *et al.*, 2019). Ainsi, dû à un nombre insuffisant de données, il a été impossible de déterminer ces dates pour certains des arbres à l'étude.

Pour calculer la CRRA, l'équation utilisée était la suivante :

$$CRRA = ((C_2 - C_1)/C_1) * 100 \%$$

où CRRA est la croissance radiale relative annuelle de l'arbre ([%]), C_2 est la circonférence du tronc de l'arbre à la fin de sa saison de croissance ([mm]) et C_1 est la circonférence du tronc de l'arbre au début de sa saison de croissance ([mm]).

Pour calculer le TACRA, l'équation était la suivante :

$$TACRA = (C_2 - C_1)/(t_2 - t_1)$$

où TACRA est le taux absolu de croissance radiale annuelle de l'arbre ([mm/jour]), C_2 est la circonférence du tronc de l'arbre à la fin de sa saison de croissance ([mm]), C_1 est la circonférence du tronc de l'arbre au début de sa saison de croissance ([mm]), t_2 est la date julienne de la fin de la saison de croissance de l'arbre ([jours]) et t_1 est la date julienne du début de la saison de croissance de l'arbre ([jours]).

3.5 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *SigmaPlot* en version 12.0 (Systat Software, Inc., 2010). Des analyses de variance (ANOVA) univariées incluant des tests de normalité de Shapiro-Wilk et des tests F ont été réalisées afin de comparer les variables *gro_start*, *gro_end*, *nbr_day*, CRRA et TACRA selon les années, les sites, les espèces et les types de bois entre eux. Dans le cas où les ANOVA univariées révélaient des différences significatives, des tests de Holm-Sidak ont été réalisés en tant qu'analyses *post-hoc* afin de déterminer l'origine de ces différences. Lorsque les conditions d'une ANOVA univariée n'étaient pas respectées (normalité et homogénéité des variances, même après la transformation des données), une ANOVA unidirectionnelle sur rangs sous la forme d'un test de Kruskal-Wallis a plutôt été utilisée. Dans le cas où les ANOVA unidirectionnelles sur rangs révélaient des différences significatives, des tests de Dunn ont été réalisés en tant qu'analyses *post-hoc* afin de déterminer l'origine de ces différences.

Dans tous les cas, le niveau de significativité (α) utilisé était de 0,050. À noter que, lorsque ces analyses statistiques ont aussi été réalisées pour les TACRA et les CRRA, seulement quatre espèces pouvaient servir à tester l'effet du site, car ces quatre espèces étaient présentes sur les deux sites.

Afin d'analyser l'impact qu'ont les variables hydroclimatiques mesurées sur la croissance radiale des quatre espèces présentes sur les deux sites (sapin baumier, érable à sucre, bouleau jaune et bouleau blanc), des régressions séquentielles avec méthode ascendante (RSMA) ayant un niveau de significativité de 0,050 ont été utilisées. Seules ces quatre espèces ont été retenues, car elles avaient un nombre d'individus suffisant pour ce type d'analyse. Les variables dépendantes étaient les TACRA, les CRRA, les TACRA en logarithmes décimaux de base 10 ($\log_{10}(\text{TACRA})$) et les CRRA en logarithmes décimaux de base 10 ($\log_{10}(\text{CRRA})$). Les variables indépendantes explicatives testées étaient le site sur lequel se trouve l'arbre (variables binaires où SBL = 0 et STE = 1) ; la classe de DHP à laquelle appartient l'arbre ; l'élévation de l'arbre ; le nombre de jours où le nombre de DJC_{air}, pour chaque T_{base} utilisée (10 °C, 15 °C et 20 °C), était supérieur ou égal à 5 DJC (N_DJCair_(10 °C ; 5 DJC), N_DJCair_(15 °C ; 5 DJC) et N_DJCair_(20 °C ; 5 DJC)), 10 DJC (N_DJCair_(10 °C ; 10 DJC), N_DJCair_(15 °C ; 10 DJC) et N_DJCair_(20 °C ; 10 DJC)) et 15 DJC (N_DJCair_(10 °C ; 15 DJC), N_DJCair_(15 °C ; 15 DJC) et N_DJCair_(20 °C ; 15 DJC)) ; le nombre de jours où le nombre de DJC_{sol}, pour chaque T_{base} utilisée (5 °C, 10 °C et 15 °C), était supérieur ou égal à 2 DJC (N_DJCsol_(5 °C ; 2 DJC), N_DJCsol_(10 °C ; 2 DJC) et N_DJCsol_(15 °C ; 2 DJC)), 5 DJC (N_DJCsol_(5 °C ; 5 DJC), N_DJCsol_(10 °C ; 5 DJC) et N_DJCsol_(15 °C ; 5 DJC)), 8 DJC (N_DJCsol_(5 °C ; 8 DJC), N_DJCsol_(10 °C ; 8 DJC) et N_DJCsol_(15 °C ; 8 DJC)) et 10 DJC (N_DJCsol_(5 °C ; 10 DJC), N_DJCsol_(10 °C ; 10 DJC) et N_DJCsol_(15 °C ; 10 DJC)) ; le nombre de jours où la valeur du VPD était supérieure ou égale à 0,50 kPa (N_VPD_{0,50 kPa}), 0,70 kPa (N_VPD_{0,70 kPa}), 0,80 kPa (N_VPD_{0,80 kPa}), 1,0 kPa (N_VPD_{1,0 kPa}) et 1,5 kPa (N_VPD_{1,5 kPa}) ; le nombre de jours où la valeur du VWC était inférieure à 10 % (N_VWC_{0 % - 10 %}) ; le nombre de jours où la valeur du VWC était supérieure ou égale à 10 % (N_VWC_{10 %}), 20 % (N_VWC_{20 %}), 30 % (N_VWC_{30 %}) et 40 % (N_VWC_{40 %}) ainsi que le nombre de jours où la valeur du SMS était supérieure ou égale à 10 kPa (N_SMS_{10 kPa}), 30 kPa (N_SMS_{30 kPa}), 60 kPa (N_SMS_{60 kPa}) et 100 kPa (N_SMS_{100 kPa}). Les RSMA ont été effectuées en utilisant les variables indépendantes hydroclimatiques de l'année concurrente pour expliquer la variabilité des taux de croissance radiaux. Elles ont aussi été effectuées en utilisant les variables indépendantes hydroclimatiques de l'année précédente. À noter que le logiciel *SigmaPlot v.12.0* gère et détecte la colinéarité en calculant les critères d'inflation de variance entre les différentes variables du modèle utilisé (Bélanger *et al.*, 2021).

Il est a noté que les données dendrométriques et hydroclimatiques de l'air et du sol hivernales ont été exclues des analyses. En effet, il s'agit d'une période durant laquelle les micro-variations du diamètre du tronc des arbres sont principalement d'origine mécanique plutôt que biologique due à l'action du gel et du dégel sur les troncs (Charra-Vaskou *et al.*, 2015 ; Zhao *et al.*, 2021).

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 SAISONS DE CROISSANCE

Les Figures 4.1.1 à 4.1.3 permettent de visualiser la durée de la saison de croissance pour les arbres des deux sites d'étude selon leur espèce et l'année. Les espèces présentées sur ces figures sont le sapin baumier (AbBa), l'érable rouge (AcRu), l'érable à sucre (AcSa), le bouleau jaune (BeAl), le bouleau blanc (BePa), le hêtre à grandes feuilles (FaGr), le frêne noir (FrNi), l'épinette blanche (PiGl), le peuplier faux-tremble (PoTr), le chêne rouge (QuRu) et le thuya occidental (ThOc). À noter qu'il s'agit d'une synthèse des résultats. Tous les résultats sont disponibles dans les Annexes R à W. Ces figures présentent aussi la classe de DHP à laquelle appartiennent les arbres suivis. Les valeurs des DHP ainsi que l'élévation de chaque arbre suivi sont disponibles dans les Annexes A et B.

Le sapin baumier, l'érable à sucre, le bouleau jaune et le bouleau blanc sont les seules espèces suivies qui sont présentes sur les deux sites expérimentaux. Dans le cas des dates de début de la saison de croissance (*gro_start*), on n'observe pas de différence entre les deux sites peu importe l'espèce (Figures 4.1.1 et 4.1.3). Dans le cas des dates de fin de la saison de croissance (*gro_end*), nous pouvons observer que le sapin baumier (Figure 4.1.3), l'érable à sucre (Figure 4.1.1) et le bouleau blanc (Figure 4.1.1) ont généralement terminé leur croissance plus tard au site STE qu'au site SBL. Le sapin baumier (Figure 4.1.3) est la seule espèce pour laquelle nous pouvons observer une différence entre les deux sites en ce qui a trait à la durée de la saison de croissance (*nbr_day*). En effet, la saison de croissance du sapin baumier a, en moyenne, une durée plus longue au site STE qu'au site SBL. Le sapin baumier est aussi la seule espèce présente sur les deux sites pour laquelle une différence significative peut être observée entre deux années. En effet, sa saison de croissance radiale de 2021 a commencé, en moyenne, légèrement plus tôt que celle de 2022 (Figure 4.1.3).

Une observation intéressante concerne le hêtre à grandes feuilles qui est présent seulement au site SBL. En effet, en 2021, deux individus ont commencé leur saison de croissance beaucoup plus tôt que leurs congénères, soit aux jours 91 et 59 (Figure 4.1.1). Ceci est inhabituel puisque cette espèce commence généralement sa croissance radiale lorsque ses feuilles sont complètement développées (Tubbs & Houston, 1990). Malgré ce début de saison hâtif, ces deux arbres ont terminé leur croissance radiale environ au même moment que les autres hêtres à grandes feuilles suivis (Figure 4.1.1). Une autre observation

concerne la durée de la saison de croissance radiale de l'épinette blanche en 2021 (Figure 4.1.3). En effet, en 2021, les deux individus suivis ont connu une très courte saison de croissance radiale (8 et 14 jours). D'un autre côté, nous pouvons aussi observer que ces deux individus ont connu une croissance radiale relativement rapide comparativement aux autres espèces suivies durant l'année 2021 (Figure 4.2.4) pour une CRRA relativement faible (Figure 4.2.3).

Nous pouvons observer que la saison de croissance de 2021 s'est terminée, en moyenne pour toutes les espèces confondues, plus tôt que celle de 2022 (moyenne au jour 207 contre moyenne au jour 223, respectivement). De plus, la saison de croissance de 2021 a duré, en moyenne, moins longtemps que celle de 2022 (moyenne de 62 jours contre moyenne de 78 jours, respectivement). La saison de croissance de 2022 a aussi duré, en moyenne, plus longtemps que celle de 2023 (moyenne de 78 jours contre moyenne de 69 jours, respectivement).

Les analyses statistiques ont révélé l'existence d'une différence significative entre les dates de début de croissance des feuillus à pores diffus et les feuillus à zones poreuses ainsi qu'entre les conifères (espèces à trachéides) et les feuillus à zones poreuses. Les feuillus à pores diffus et conifères ont commencé leurs saisons de croissance en moyenne plus tôt que les espèces à zones poreuses (moyennes aux jours 146 et 147 contre moyenne au jour 139, respectivement).

Par ailleurs, au site SBL, nous pouvons observer une différence significative entre les dates de fin de la saison de croissance des conifères et des feuillus (espèces à pores diffus et espèces à zones poreuses). En effet, les conifères ont fini leurs saisons de croissance en moyenne plus tôt que les feuillus (moyenne au jour 194 contre moyenne au jour 210, respectivement) sur ce site. Les conifères ont aussi eu une saison de croissance radiale plus courte que tous les feuillus sur ce site (moyenne de 51 jours contre moyenne de 69 jours, respectivement). Au site STE, il n'y a pas de différence observable entre les conifères et les feuillus en ce qui a trait aux dates de début et de fin de saison de croissance et à la durée de la saison de croissance.

Lorsque nous comparons les deux sites entre eux, nous observons que les conifères ont fini leurs saisons de croissance en moyenne légèrement plus tard au site STE qu'au site SBL (moyenne au jour 232 contre moyenne au jour 194, respectivement). Leurs saisons de croissance ont aussi duré plus longtemps sur ce site qu'au site SBL (moyenne de 81 jours contre moyenne de 51 jours, respectivement).

Pour ce qui est des espèces à pores diffus, nous pouvons constater que les arbres du site STE ont, en moyenne, commencé leurs saisons de croissance légèrement plus tard par rapport à ceux du site SBL (moyenne au jour 150 contre moyenne au jour 144, respectivement). D'un autre côté, ils ont aussi terminé leurs saisons de croissance, en moyenne, légèrement plus tard au site STE qu'au site SBL (moyenne au jour 223 contre moyenne au jour 209, respectivement).

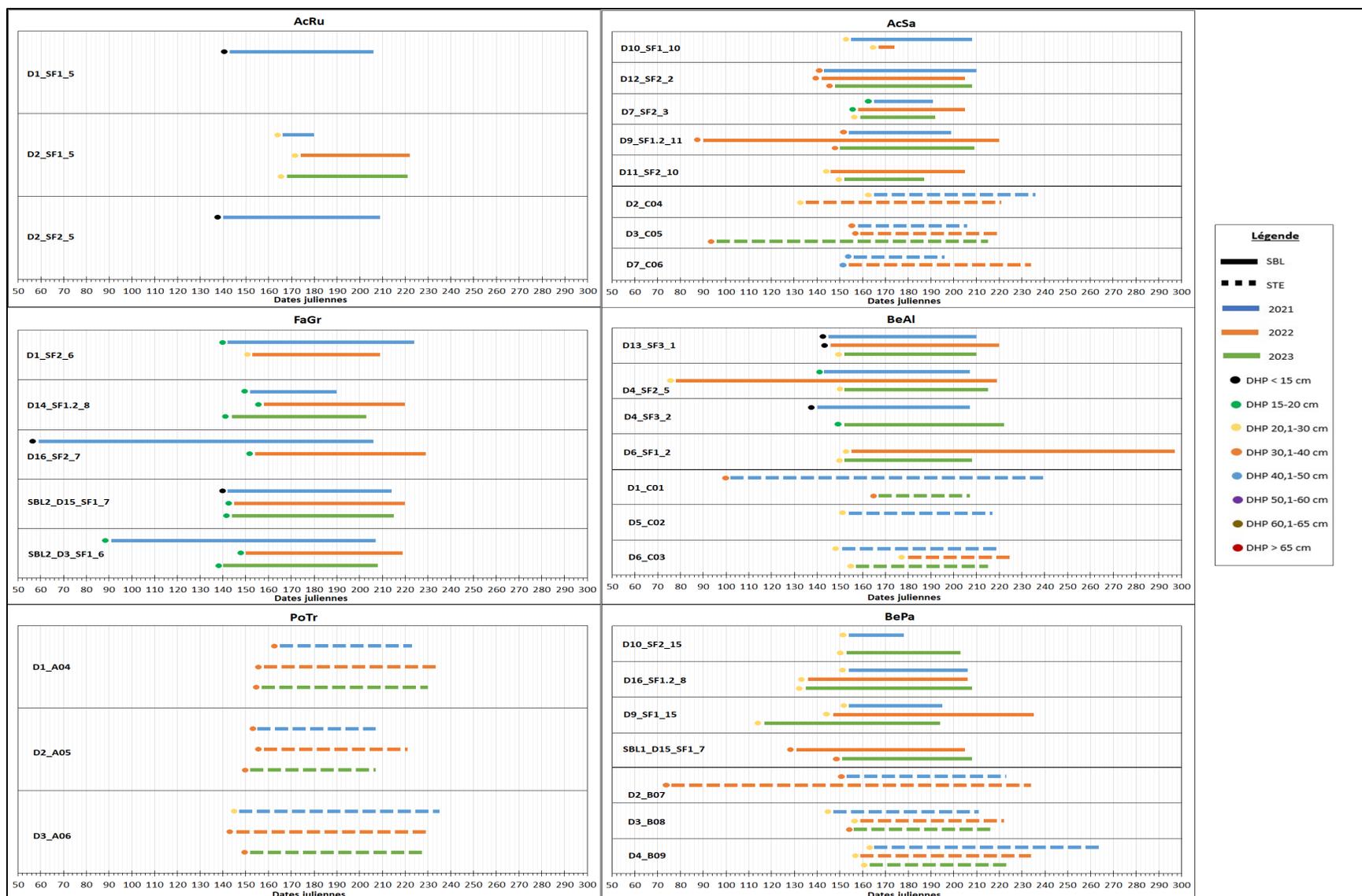


Figure 4.1.1 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à pores diffus (PD) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

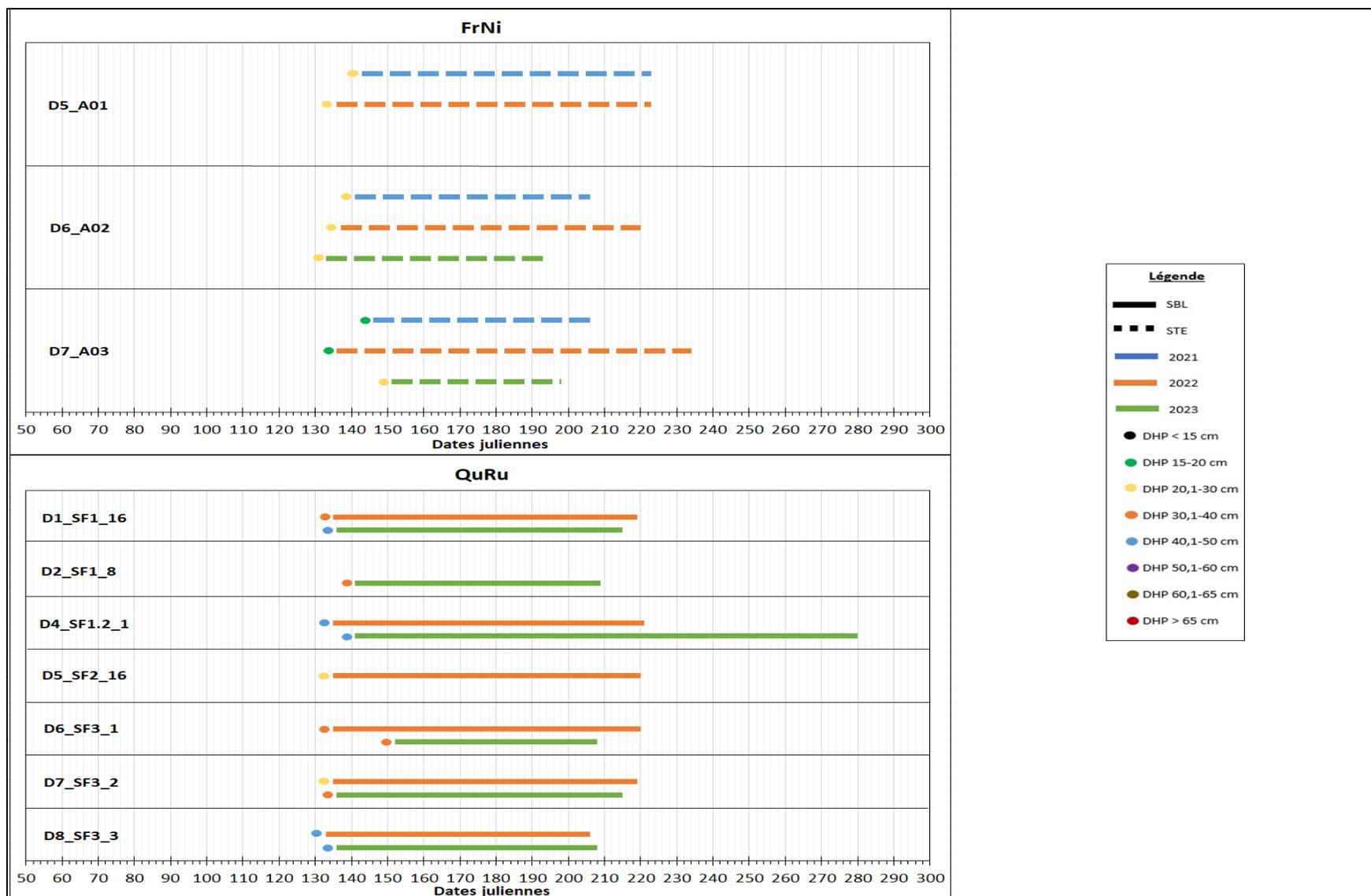


Figure 4.1.2 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à zones poreuses (ZP) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

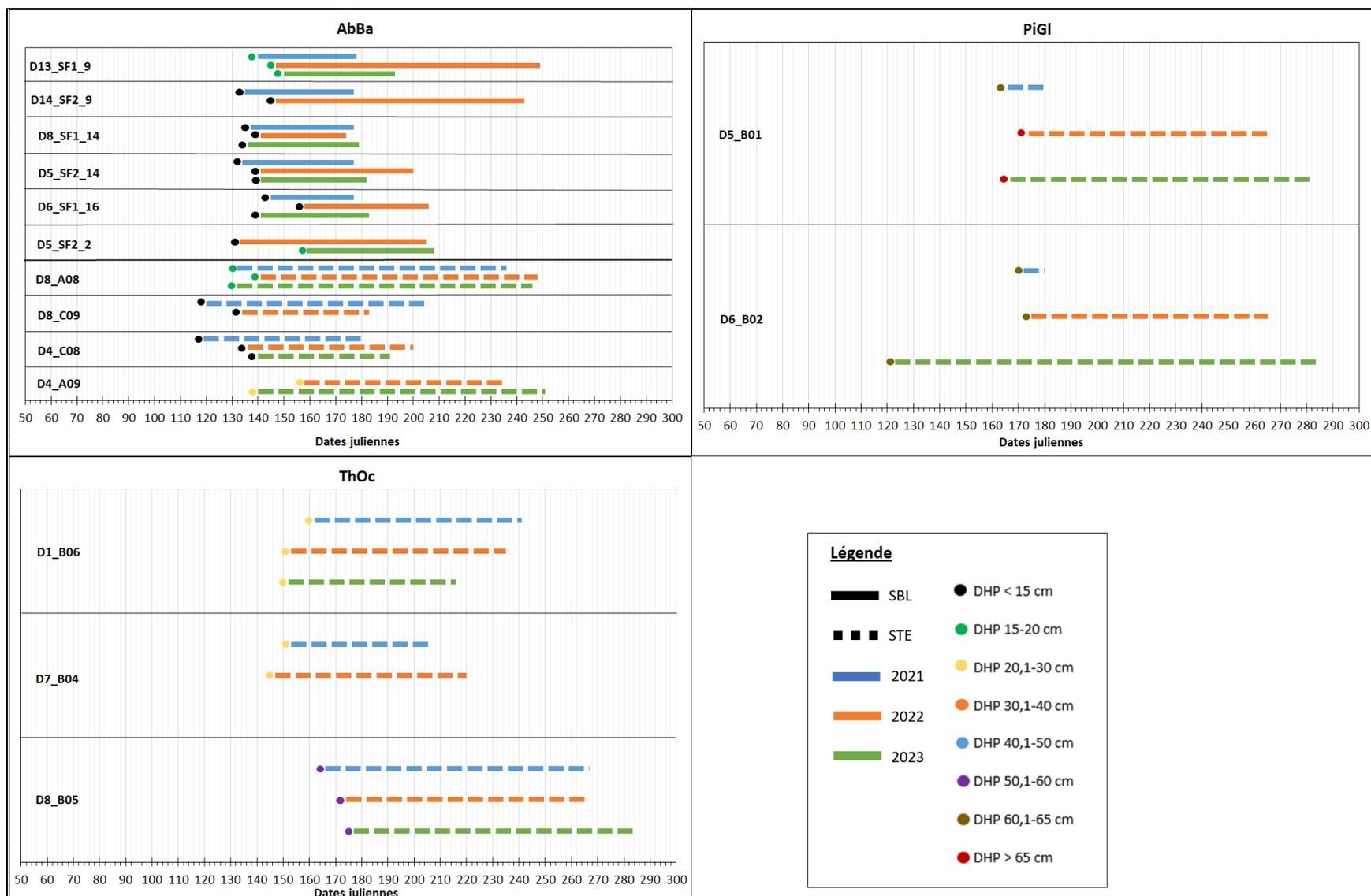


Figure 4.1.3 : Comparaison des dates de début ([dates juliennes]) et de fin ([dates juliennes]) des saisons de croissance ainsi que des durées ([jours]) de ces dernières pour les différentes espèces à trachéides (conifères ; TR) suivis selon leur classe de DHP ([cm]), l'année et le site où ils sont situés. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

4.2 COMPARAISON DE LA CROISSANCE RADIALE ENTRE LES SITES POUR LES ESPÈCES COMMUNES AUX DEUX SITES

Les Figures 4.2.1 et 4.2.2 permettent de visualiser la distribution des croissances radiales relatives annuelles (CRRRA ; [%]) ainsi que des taux absolues de croissance radiale annuelle (TACRA ; [mm/jour]) pour les trois années de suivi selon l'arbre et le site pour les quatre espèces présentes sur les deux sites. Les Figures 4.2.3 et 4.2.4 permettent de visualiser les variabilités intraspécifiques et interspécifiques des CRRRA ainsi que des TACRA pour les trois années de suivi pour l'ensemble des espèces. La totalité de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W. À noter que des exemples de courbes de croissance radiale pour chaque espèce suivie sont disponibles dans les Annexes G à Q.

Le sapin baumier, l'érable à sucre, le bouleau jaune et le bouleau blanc sont les espèces suivies aux deux sites. Parmi ces quatre espèces, nous n'observons pas de différence entre les sites pour l'érable à sucre et le bouleau blanc en ce qui a trait aux CRRRA (Figures 4.2.1 et 4.2.3) ainsi qu'aux TACRA (Figures 4.2.2 et 4.2.4). Pour le bouleau jaune, nous ne constatons une différence entre les sites qu'en ce qui a trait aux CRRRA puisque la croissance radiale a été plus importante au site SBL (Figures 4.2.1 et 4.2.3). Le sapin baumier est la seule espèce pour laquelle nous observons une différence entre les sites en ce qui a trait à ces deux variables puisque les valeurs sont généralement plus élevées au site STE (Figures 4.2.1 à 4.2.4).

Nous pouvons aussi observer que le sapin baumier est l'espèce présente sur les deux sites qui montre généralement la plus grande variabilité au niveau des CRRRA (Figure 4.2.3) et des TACRA (Figure 4.2.4). Par ailleurs, nous constatons aussi que le sapin baumier du site STE montre nettement une variabilité plus importante de la CRRRA qu'au site SBL (Figure 4.2.3). Le bouleau jaune du site STE, quant à lui, semble avoir une variabilité des CRRRA légèrement moins importante qu'au site SBL (Figure 4.2.3). De plus, le sapin baumier du site STE semble présenter une plus faible variabilité de ses TACRA qu'au site SBL (Figure 4.2.4). D'ailleurs, le sapin baumier semble être l'espèce ayant généralement eu la plus grande variabilité de ces deux variables parmi les quatre espèces présentes sur les deux sites.

Le hêtre à grandes feuilles est l'espèce suivie (site SBL seulement) qui montre constamment la CRRRA la plus importante pour les trois années de suivi (Figure 4.2.3). Il s'agit aussi de l'une des espèces dont les CRRRA et TACRA sont parmi les plus variés, et ce durant chacune des trois années de suivi (Figure 4.2.3 et 4.2.4). Les conifères du site STE ont aussi vu leurs TACRA être plus importantes que ceux du site SBL (moyenne d'environ 0,100 mm/jour contre 0,052 mm/jour, respectivement).

Pour ce qui est des feuillus à zones poreuses, la seule différence entre les deux sites est que les arbres du site STE ont eu, en moyenne, une CRRRA plus importante que ceux du site SBL (moyenne d'environ 1,106 % contre moyenne d'environ 0,626 %, respectivement).

Dans un autre ordre d'idées, lorsque l'on ne prend en compte que les quatre espèces présentes sur les deux sites, on peut constater que les feuillus à pores diffus ont eu une croissance radiale plus rapide que les conifères (moyenne d'environ 0,102 mm/jour contre moyenne d'environ 0,078 mm/jour, respectivement). De plus, seuls les conifères (dans ce cas-ci, il s'agit uniquement de sapins baumiers) présentent des différences entre les sites en ce qui a trait aux CRRRA ainsi qu'aux TACRA. En effet, les conifères du site STE ont une CRRRA moyenne plus importante que celle des conifères du site SBL (moyenne d'environ 0,100 % contre moyenne d'environ 0,052 %, respectivement) ainsi qu'un TACRA moyen beaucoup plus élevé que celui du site SBL (moyenne d'environ 1,574 mm/jour contre moyenne d'environ 0,543 mm/jour, respectivement).

Par ailleurs, lorsque nous prenons en compte que les quatre espèces présentes sur les deux sites, nous observons, au site SBL, une différence significative entre les TACRA des conifères et des feuillus. En moyenne, le TACRA des conifères du site SBL est plus faible que celui des feuillus de ce site (moyenne d'environ 0,052 % contre moyenne d'environ 0,101 %, respectivement). Au site STE, nous pouvons observer que les conifères ont, en moyenne, une CRRRA plus élevée que celle des feuillus de ce même site (moyenne d'environ 0,958 mm/jour contre moyenne d'environ 0,616 mm/jour, respectivement).

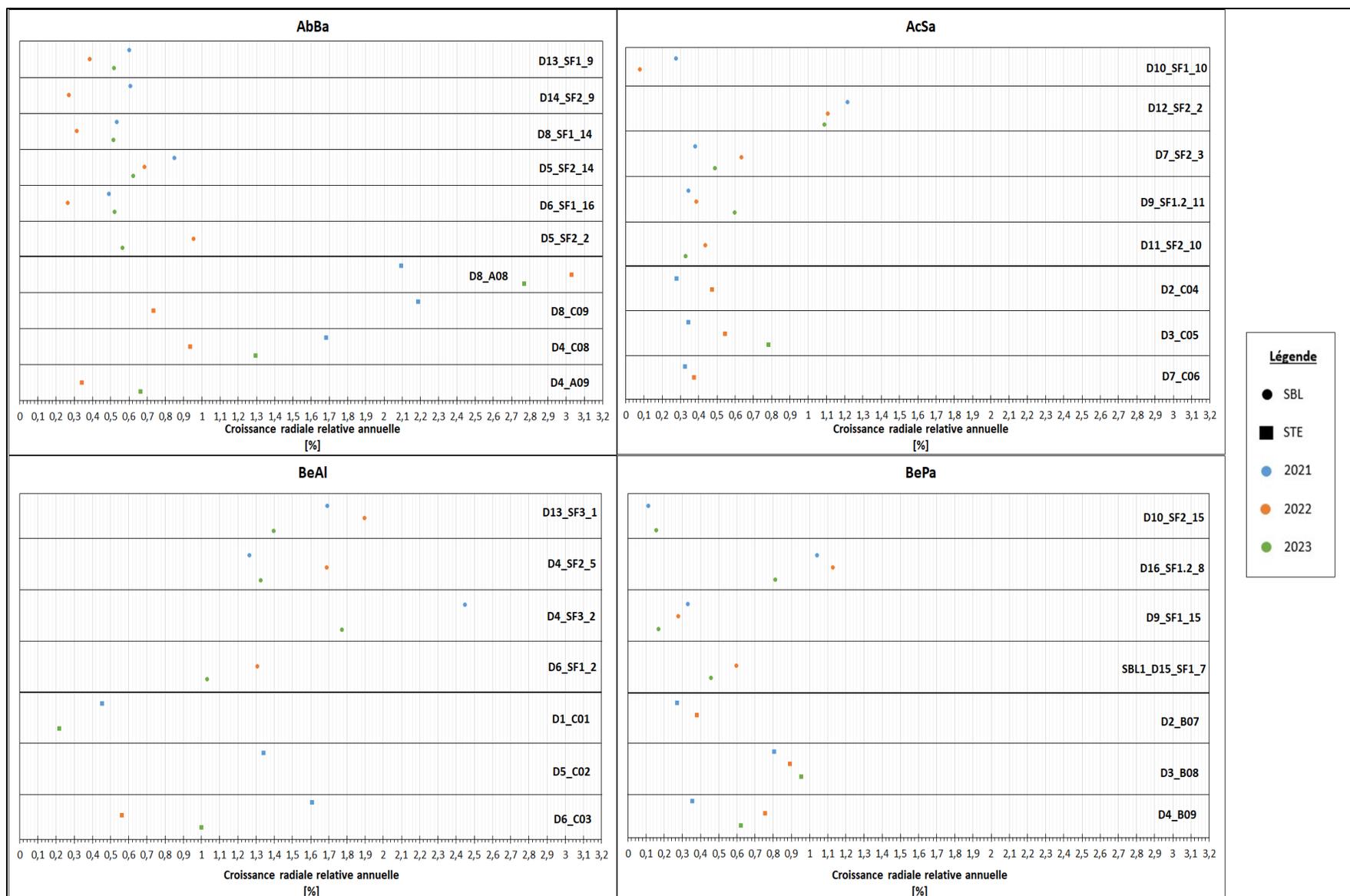


Figure 4.2.1 : Comparaison des croissances radiales relatives annuelles (CRRRA ; [%]) des saisons de croissance 2021, 2022 et 2023 pour les quatre espèces présentes sur les deux sites d'étude. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

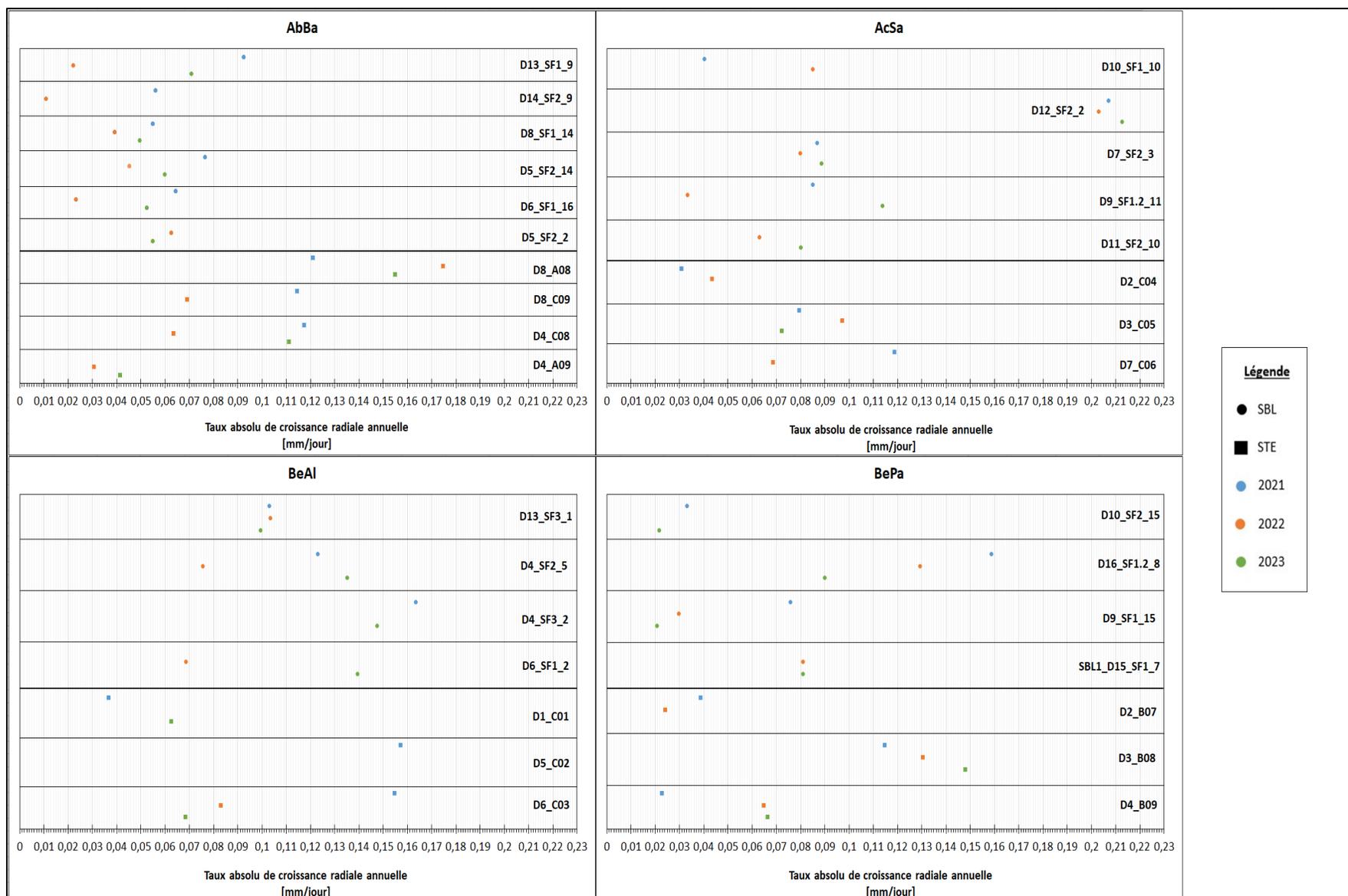


Figure 4.2.2 : Comparaison des taux absolus de croissance radiale annuelle (TACRA ; [mm/jour]) des saisons de croissance 2021, 2022 et 2023 pour les quatre espèces présentes sur les deux sites d'étude. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

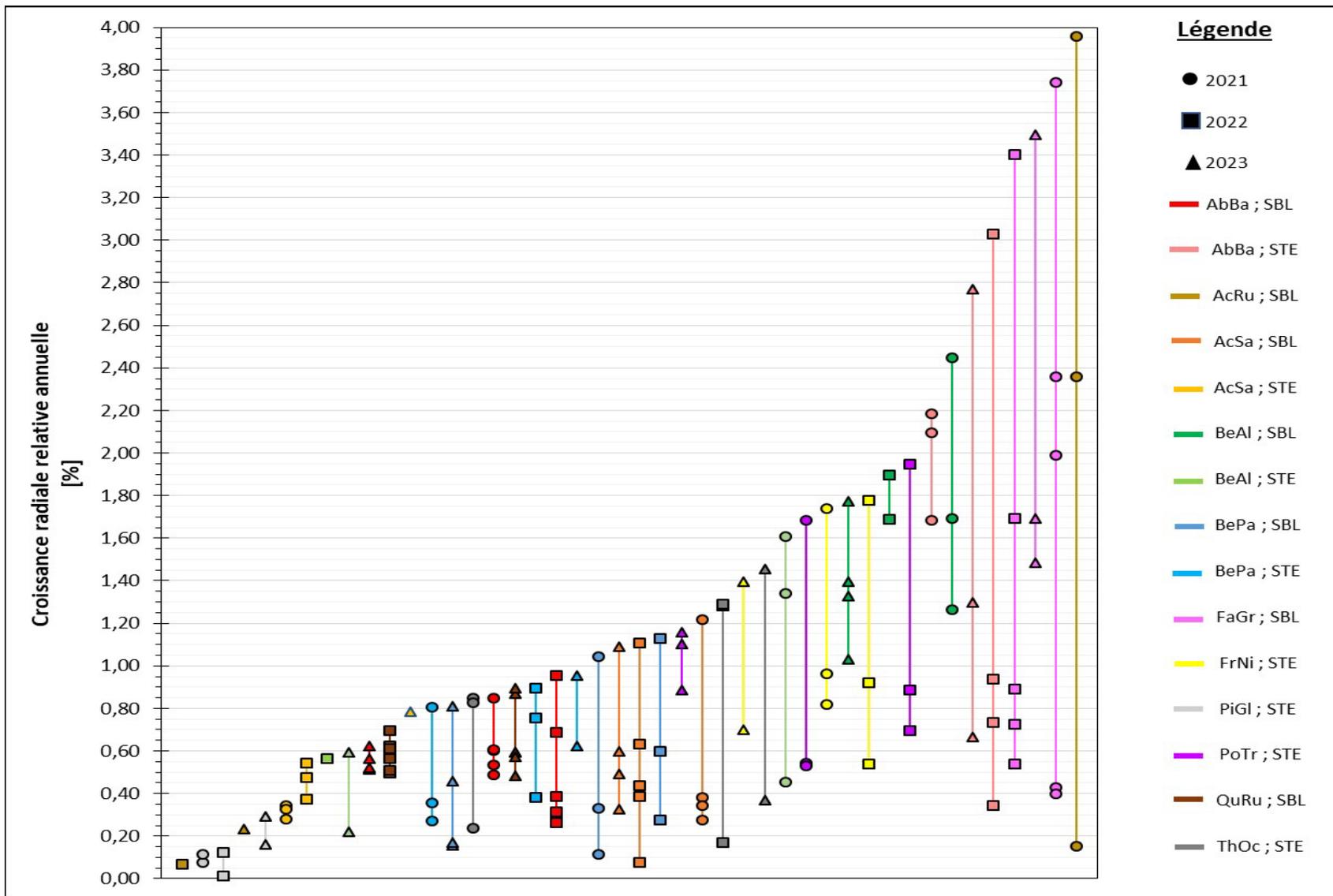


Figure 4.2.3 : Comparaison des variations intraspécifiques de la croissance radiale relative annuelle (CRRR ; [%]) des différentes espèces suivies selon l'année ainsi que le site d'étude et arrangée de façon croissante selon la valeur la plus élevée. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

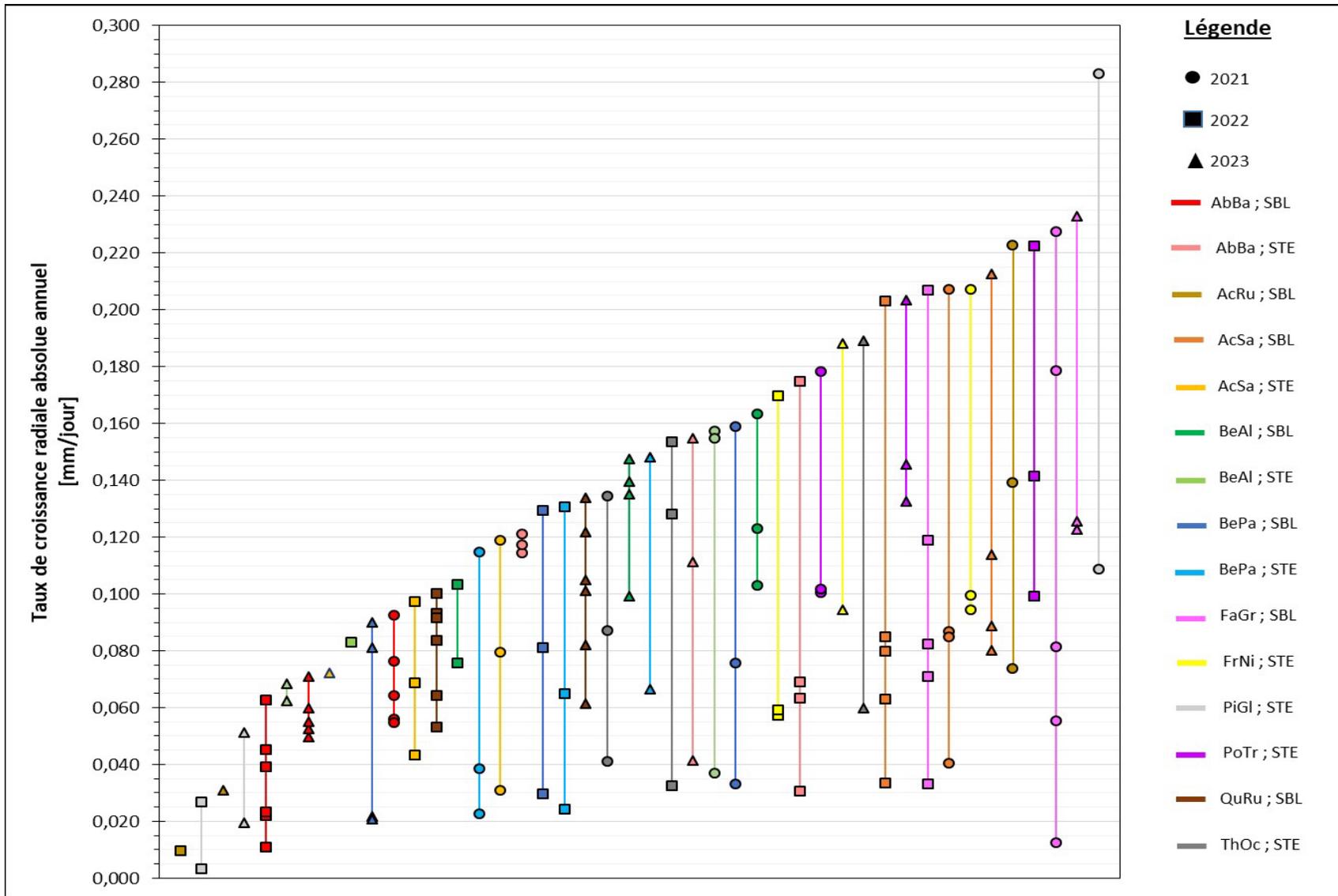


Figure 4.2.4 : Comparaison des variations intraspécifiques du taux absolu de croissance radiale annuelle (TACRA ; [mm/jour]) des différentes espèces suivies selon l'année ainsi que le site d'étude et arrangée de façon croissante selon la valeur la plus élevée. L'ensemble de ces valeurs est disponible dans les Annexes R à W.

4.3 INFLUENCE DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL SUR LA CROISSANCE RADIALE

Le Tableau 4.3.1 résume les résultats obtenus suite aux différentes régressions séquentielles avec méthodes ascendante (RSMA) pratiquées sur les données de croissance radiale et pour lesquelles le niveau de significativité (α) est inférieur à 0,050. À noter que les résultats présentés dans ce tableau ne correspondent qu'aux RSMA menées avec les variables indépendantes hydroclimatiques des années concurrentes pour expliquer la variabilité des taux de croissance radiale. Les seules espèces qui ont été incluses dans les RSMA sont les quatre espèces présentes sur les deux sites, soit le sapin baumier (AbBa), l'érable à sucre (AcSa), le bouleau jaune (BeAl) et le bouleau blanc (BePa). Les résultats incluent les variables indépendantes ressortantes, les coefficients de corrélation (R), les coefficients de détermination (R^2) ainsi que les seuils de significativité (P) obtenus. À noter que, lorsqu'il n'y avait pas de variables indépendantes qui ressortaient pour une variable dépendantes, la mention NA est incluse dans le Tableau 4.3.1. La liste complète des variables indépendantes testées lors des RSMA est disponible dans la Méthodologie (Section 3.4). Les valeurs associées aux variables dépendantes et indépendantes testées sont disponibles dans les Annexes A à F ainsi que dans les Annexes R à Y.

Tableau 4.3.1 : Régressions séquentielles avec méthode ascendante (RSMA) expliquant les taux de croissance radiale à partir des variables indépendantes hydroclimatiques des années concurrentes. Le niveau de significativité (α) est de 0,050 et N est le nombre d'échantillons analysés.

Espèces	N	Variables dépendantes	Variables indépendantes ressortantes	R	R ²	P ($\alpha = 0,050$)
AbBa	26	TACRA	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACRA)	N_DJCair _(10 °C ; 5 DJC)	-0,636	0,404	< 0,001
			N_VWC _{0 % - 10 %}	-0,636	0,404	< 0,001
		CRRA	NA	NA	NA	NA
log ₁₀ (CRRA)	N_VPD _{0,50 kPa}	-0,687	0,472	< 0,001		
BeAl	16	TACRA	N_SMS _{30 kPa}	-0,532	0,283	0,034
		CRRA	N_VWC _{40 %}	-0,578	0,335	0,019
			Classes de DHP	-0,785	0,617	< 0,001
		log ₁₀ (TACRA)	Classes de DHP	-0,527	0,278	0,036
		log ₁₀ (CRRA)	N_VWC _{40 %}	-0,689	0,475	0,003
Classes de DHP	-0,723		0,523	0,002		
AcSa	20	TACRA	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACRA)	NA	NA	NA	NA
		CRRA	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (CRRA)	NA	NA	NA	NA
BePa	18	TACRA	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACRA)	NA	NA	NA	NA
		CRRA	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (CRRA)	NA	NA	NA	NA

La première observation que nous pouvons faire est qu'aucune des variables indépendantes analysées lors des RSMA n'a été retenues pour l'érable à sucre et le bouleau blanc peu importe la variable dépendante utilisée. Dans ce sens, aucun modèle n'a pu être généré pour expliquer de façon significative la variabilité des CRRA et TACRA. Toutefois, nous observons que, pour le sapin baumier, le nombre de jours pour lesquels le nombre de degrés-jours de croissance de l'air (avec une température de base de 10 °C) était supérieur ou égal à 5 DJC (N_DJCair_(10 °C ; 5 DJC)), le nombre de jours pour lesquels la teneur en eau du sol était inférieure à 10 % (N_VWC_{0 % - 10 %}) et le nombre de jours pour lesquels le déficit de pression de vapeur

était supérieur ou égal à 0,50 kPa ($N_{VPD_{0,50 \text{ kPa}}}$) expliquent de 40 % à 47 % de la variabilité des CRRA et des TACRA en base logarithmique ($\log_{10}(\text{CRRA})$ et $\log_{10}(\text{TACRA})$). Par ailleurs, les classes de DHP et le nombre de jours pour lesquels la teneur en eau du sol était supérieure ou égale à 40 % ($N_{VWC_{40\%}}$) expliquent entre 27 % et 62 % de la variabilité des CRRA et TACRA du bouleau jaune. Les modèles ne comptent qu'une seule variable explicative et, dans aucun cas, l'ajout d'une deuxième variable n'augmentait le pouvoir prédictif de ces derniers. De plus, la valeur du R de toutes les variables indépendantes ressortantes est négative, ce qui indique que ces variables affectent négativement les différents paramètres de la croissance radiale.

Lorsque l'on utilise les variables hydroclimatiques des années précédentes (Annexe Y), encore une fois, on peut observer qu'aucune de ces variables ne permet de mieux expliquer la croissance radiale de l'érable à sucre et du bouleau blanc. Chez le bouleau jaune, la majorité de la croissance radiale est, encore une fois, expliquée par des variables exprimant la disponibilité en eau comme le déficit de pression de vapeur de l'air (VPD), le contenu volumétrique en eau du sol (VWC) et le potentiel hydrique du sol (SMS). Les classes de DHP reviennent aussi et sont souvent la variable indépendante prenant le dessus lorsque toutes les variables indépendantes sont testées dans une RSMA. On explique jusqu'à 74 % et 90 % de la variabilité de la croissance radiale avec le VWC et les classes de DHP, respectivement. En ce qui a trait au sapin baumier, peu de variables expliquent la croissance radiale, sauf le nombre de jours pour lesquels le nombre de degrés-jours de croissance du sol (avec température de base de 5 °C) était supérieur ou égal à 5 DJC ($N_{DJC_{sol(5\text{ °C}; 5 \text{ DJC})}}$), le nombre de jours pour lesquels le VWC était supérieur ou égale à 30 % ($N_{VWC_{30\%}}$) et les sites, les deux dernières variables prenant le dessus lorsque toutes les variables indépendantes sont testées dans une RSMA. On explique jusqu'à 59 % de la variabilité de $\log_{10}(\text{CRRA})$ par les sites.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 CROISSANCE RADIALE DE 2021 À 2023

5.1.1 DIFFÉRENCES ENTRE LES CONIFÈRES ET LES FEUILLUS AU NIVEAU DES SAISONS DE CROISSANCE ET DES TAUX DE CROISSANCE RADIALE

La deux premières hypothèses de cette étude sont que, dans les régions tempérées, la saison de croissance et la croissance radiale des conifères devraient être, respectivement, plus courte et plus faible que celles des feuillus lorsque la température est plus élevée et l'eau moins disponible. Les résultats corroborent en bonne partie ces hypothèses puisqu'au site SBL, le site le plus chaud et sec (voir Annexe X pour un tableau des valeurs saisonnières moyennes des différentes variables hydroclimatiques suivies), les conifères ont exhibé des saisons de croissance, en moyenne, plus courtes et ayant finie plus tôt que les feuillus. De plus, sur ce même site, les conifères ont exhibé des taux de croissance absolue annuels (TACRA) être, en moyenne, inférieurs à ceux des feuillus. Au contraire, au site STE, soit le site le plus froid et humide (voir Annexe X), la croissance radiale relative annuelle (CRRRA) des conifères était, en moyenne, plus élevée que celle des feuillus de ce site. En plus de validés en bonne parties les deux premières hypothèses de cette étude, ces résultats semblent aussi être en accord avec ce que l'on retrouve dans la littérature.

En effet, dans les forêts tempérées nordiques, la hausse des températures hivernales dues aux changements climatiques semble induire une baisse de l'influence qu'a la température de l'air sur la croissance des feuillus ainsi qu'une augmentation de son influence sur la croissance radiale des conifères (Harvey *et al.*, 2019). De plus, la réduction de la croissance induite par les sécheresses est souvent plus élevée chez les conifères comparativement aux feuillus (Zlobin, 2022). Song *et al.* (2021) suggèrent même que la productivité de la majorité des conifères devrait être réduite dans un climat plus chaud et sec bien qu'ils n'aient pas observé de lien entre leur potentiel de croissance et la sensibilité de leur croissance au climat. Sachant que des températures plus élevées favorisent plus la croissance des feuillus que celle des conifères (Way & Oren, 2010), nous pouvions effectivement nous attendre à ce que, sur le site le plus chaud (ici, le site SBL), les feuillus présentent une croissance radiale plus rapide ou importante que les conifères.

Pour ce qui est des résultats obtenus sur le site le plus frais et humide (ici, le site STE), ces derniers semblent aussi être en accord avec la littérature. En effet, Oogathoo *et al.* (2024) montrent que la

croissance des conifères est favorisée par l'humidité relative du site. De plus, le fait que la CRRA des feuillus soit inférieure à celle des conifères sur ce site pourrait ainsi être dû au fait que la croissance des feuillus des forêts tempérées nordiques est retardée par une plus grande humidité atmosphérique (Sellin *et al.*, 2017).

Par ailleurs, le sapin baumier est la seule espèce présente sur les deux sites qui présente une différence au niveau de la longueur de sa saison de croissance entre les deux sites. En effet, le sapin baumier du site STE, le site le plus nordique, froid et humide, exhibe une saison de croissance plus longue que celui du site SBL, principalement caractérisée par une fin de croissance plus tardive. Ceci indique que, dans le nord de son aire de répartition, la durée de la saison de croissance du sapin baumier est dépendante de l'humidité et de la température du site. Si l'on prend en compte les variables hydroclimatiques des années précédentes qui ont été retenues pour cette espèce, ces résultats semblent être en accord avec ceux de Oogathoo *et al.* (2022). En effet, ceux-ci montrent qu'un sol plus chaud et sec favorise l'arrêt précoce de la saison de croissance. De plus, la croissance radiale du sapin baumier est stimulée par une forte humidité relative et une faible température de l'air au nord de son aire de répartition (Duchesne & Houle, 2011 ; Oogathoo *et al.*, 2024), ce qui explique sans doute la saison de croissance plus longue sur le site STE. Par conséquent, les conditions du site STE auraient permis au sapin baumier de croître plus longtemps sur ce site qu'au site SBL, le dernier étant le site le plus chaud et sec.

5.1.2 ABSENCE DE DIFFÉRENCE ENTRE LES ESPÈCES À PORES DIFFUS ET LES ESPÈCES À ZONES POREUSES

La troisième hypothèse de cette étude est que, indépendamment du site dans lequel ils se trouvent, les espèces à pores diffus et à zones poreuses devraient avoir une réponse similaire face aux aléas météorologiques et aux conditions propres aux sites. Les résultats obtenus pour les trois saisons de croissance semblent valider cette hypothèse. En effet, à l'exception des dates de début de la saison de croissance, ces espèces ne montrent pas de différence significative en ce qui a trait aux différents paramètres de la croissance radiale des troncs.

Ces résultats sont en accord avec les conclusions d'une étude de Buttó *et al.* (2021). En effet, selon Buttó *et al.* (2021), face à un événement de sécheresse, la réponse des espèces à pore diffus et à zones poreuses est similaire. Les conclusions de Buttó *et al.* (2021) ainsi que les résultats de la présente étude sont appuyés par le fait que, sous une augmentation de la fréquence et de la sévérité des sécheresses estivales, la majorité des feuillus subit une réduction similaire de la conductivité hydraulique potentiel de leur xylème,

ce qui entraîne une réduction similaire de leur croissance (Zimmermann *et al.*, 2021). À noter que, contrairement à ce qu'ont observé D'Orangeville *et al.* (2022) par le passé, aucune des données récoltées lors de la présente étude ne suggèrent que les espèces à pores diffus que nous avons suivies aient eu une croissance initiale plus rapide ou un taux de croissance maximal plus tardif que les espèces à zones poreuses. Par ailleurs, le décalage observé en ce qui a trait au commencement de la saison de croissance entre les deux groupes fonctionnels pourrait simplement être dû au fait que les espèces à zones poreuses ont naturellement tendance à produire leur feuillage plus tard que les espèces à pores diffus au cours de la période de débourrement (Savage *et al.*, 2022). Ainsi, à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, il semblerait que, au moins à court terme, le réchauffement du climat ne devrait pas plus affecter la croissance radiale des espèces à pores diffus que celle des espèces à zones poreuses.

5.1.3 LES VARIABLES HYDROLOGIQUES EXPLIQUENT LE MIEUX LA CROISSANCE RADIALE DU SAPIN BAUMIER ET DU BOULEAU JAUNE

La quatrième hypothèse de cette étude est que les variables hydrologiques devraient avoir plus d'impacts sur la croissance radiale des arbres suivis que les variables physiques (élévation, classes de DHP, etc.) ou que celles liées à la température. Cette hypothèse est toutefois seulement confirmée pour le sapin baumier ainsi que pour le bouleau jaune. Dans le cas de l'érule à sucre et du bouleau blanc, aucune des nombreuses variables étudiées n'a permis d'expliquer de façon significative sur leur croissance radiale au cours des trois années de suivi.

Dans le cas du sapin baumier, la CRRA est expliquée à 47,2 % par le nombre de jours durant lesquels le déficit de pression de vapeur de l'air (VPD) est supérieur ou égal à 0,50 kPa ($N_{VPD_{0,50 \text{ kPa}}}$). Cette valeur relativement basse du VPD indique que la CRRA est très fortement sensible à cette variable météorologique. Ainsi, même lorsque l'humidité atmosphérique est relativement élevée, la CRRA du sapin baumier peut être négativement affectée par une légère augmentation du VPD. Dans le cas du TACRA, les résultats obtenus indiquent que ce paramètre a une relation négative avec le nombre de jours pour lesquels le contenu volumétrique en eau du sol est inférieur à 10 % ($N_{VWC_{0\% - 10\%}}$) et pour lesquels le nombre de degrés-jours de croissance de l'air est supérieur ou égal à 5 DJC pour une température de base de 10 °C ($N_{DJC_{air(10\text{ }^{\circ}\text{C}; 5 \text{ DJC})}}$). Ces deux variables expliquent chacune 40,4 % de la TACRA du sapin baumier. Ces résultats correspondent à ce que l'on retrouve dans la littérature. Par exemple, dans les forêts tempérées de l'est du Canada, Vaughn *et al.* (2021) suggèrent que le sapin baumier est particulièrement

vulnérable à la sécheresse ainsi qu'à une augmentation des températures. D'un autre côté, selon Duchesne *et al.* (2012), la cessation de la croissance radiale chez le sapin baumier ne semble pas directement liée au climat. Ceci n'a toutefois pas été observé avec nos résultats puisque le sapin baumier des deux sites n'ont pas terminé leur saison de croissance au même moment puisque le sapin baumier du site STE a terminé sa saison de croissance, en moyenne, plus tardivement que celui du site SBL. Ces résultats suggèrent plutôt que, dans la région d'étude, l'arrêt de la croissance radiale est lié aux variables hydroclimatiques testées comme ce qui a été observé par Oogathoo *et al.* (2023) chez le sapin baumier de la forêt boréale.

Pour ce qui est du bouleau jaune, la CRRA est majoritairement expliquée par la classe de DHP indiquant que cette espèce croît moins au fur et à mesure que le diamètre de son tronc augmente. Les résultats obtenus montrent aussi que les individus de bouleau jaune caractérisés par de plus larges troncs croissent moins rapidement que ceux de plus petits troncs. Ces résultats sont en accord avec une étude de Bigelow *et al.* (2020) montrant que les individus de bouleau jaune de petites tailles croissent plus vite que ceux de grandes tailles. Les deux seules variables hydroclimatiques expliquant la croissance radiale du bouleau jaune sont le nombre de jours pour lesquels le potentiel hydrique du sol est supérieur ou égal à 30 kPa ($N_{SMS_{30\text{ kPa}}}$) ainsi que le nombre de jours pour lesquels le contenu volumétrique en eau du sol est supérieur ou égal à 40 % ($N_{VWC_{40\%}}$). Ces deux variables sont négativement corrélées aux TACRA et aux CRRA, respectivement. Cela indique que l'humidité du sol a plus d'impact que l'humidité de l'air ou la température sur la croissance radiale de cette espèce à la limite septentrionale de l'érablière à bouleau jaune. Cela indique aussi que la croissance radiale du bouleau jaune peut être réduite par des sols trop humides. Ces résultats rejoignent ce qui peut être observé dans la littérature. En effet, le bouleau jaune pousse généralement mieux sur des sols bien drainés bien qu'il puisse aussi croître abondamment dans des sols avec un drainage restreint à cause d'une plus faible compétition interspécifique (Erdmann, 1990). D'un autre côté, une étude de Rasheed & Delagrangé (2016) montre qu'un déficit hydrique modéré du sol a pour effet de réduire l'accumulation de biomasse chez le bouleau jaune, mais sans changer l'allocation relative de la biomasse aux différents compartiments de l'arbre.

Pour ce qui est de l'érable à sucre et du bouleau blanc, l'impossibilité d'inclure une seule variable mesurée dans cette étude au cours des régressions séquentielles avec méthode ascendante (RSMA) peut indiquer plusieurs choses. Tout d'abord, il est possible que d'autres variables physiques, météorologiques ou environnementales que nous n'avons pas prises en compte lors de cette étude permettent de mieux

expliquer la croissance radiale de ces deux espèces. Cela peut aussi indiquer que, à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, les variations des conditions hydroclimatiques ont très peu (ou pas) d'influence sur la croissance radiale de l'érable à sucre ainsi que du bouleau jaune malgré le fait que ces deux espèces se trouvent respectivement au nord (RNCAN, 2022c) et au sud (RNCAN, 2022e) de leur aire de répartition.

5.1.4 ABSENCE D'EFFETS DE LA LIMITE MÉRIDIONALE DES AIRES DE RÉPARTITION SUR LA CROISSANCE RADIALE

La cinquième hypothèse de cette étude est que les espèces situées à la limite méridionale de leur aire de répartition devraient avoir une croissance radiale plus faible que celles qui sont situées à la limite septentrionale de leur aire de répartition. Les résultats que nous avons obtenus semblent invalider celle-ci. En effet, parmi les quatre espèces présentes sur les deux sites, les analyses statistiques n'ont pas révélé de différence significative en termes de croissance radiales des espèces situées au sud de leur aire de répartition et celle des espèces situées au nord de leur aire de répartition.

Ces résultats pourraient être dû au fait que les conditions des sites d'étude ont permis aux espèces situées au sud de leur aire de répartition (ici, le sapin baumier (RNCAN, 2022a) et le bouleau blanc (RNCAN, 2022e)) d'avoir une croissance radiale semblable à celle située au nord de son aire de répartition (ici, l'érable à sucre (RNCAN, 2022c)). Cependant, de nombreuses études montrent aussi que, dans l'hémisphère nord, la croissance des arbres est généralement corrélée négativement avec la température lorsqu'ils se trouvent au sud de leur aire de répartition alors que cette corrélation est généralement positive chez les arbres se trouvant au nord de la limite de leur aire de répartition (Bošel'a *et al.*, 2014 ; de Luis *et al.*, 2013 ; Mäkinen *et al.*, 2002 ; Marquis, 2016 ; St. George & Ault, 2014). Or, les résultats obtenus montrent que les différents paramètres de la croissance radiale sont corrélés négativement avec les variables hydroclimatiques suivies, peu importe l'espèce. De plus, selon Johnston *et al.* (2009), les arbres situés au sud de leur aire de répartition semblent être plus sensibles aux aléas climatique liés à la température, ce que l'on ne semble pas observé dans cette étude.

5.1.5 SENSIBILITÉ DE LA CROISSANCE RADIALE DES ESPÈCES ET GROUPES D'ESPÈCES AUX ALÉAS HYDROCLIMATIQUES

Les résultats de cette étude suggèrent que parmi les quatre espèces présentes sur les deux sites, le sapin baumier est celle dont la croissance radiale présente les plus grandes variations entre les deux sites. De plus, les relations négatives relativement fortes entre les paramètres de la croissance radiale du sapin

baumier et la température de l'air ainsi qu'avec le VPD suggèrent que, pour la région étudiée, les aléas météorologiques ont un impact négatif considérable sur cette espèce. Ces résultats sont en accord avec ceux de Périé & de Blois (2016) qui prédisent que les habitats forestiers situés à la limite nord du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune deviendront de moins en moins favorables au sapin baumier.

À l'inverse, l'érable à sucre est l'une des quatre espèces présentes sur les deux sites qui ne semble pas montrer de sensibilité aux aléas hydroclimatiques puisque nous n'avons pas pu établir de relation entre les paramètres de la croissance radiale et les variables hydroclimatiques de l'air et du sol, peu importe le site sur lequel l'espèce se trouve. Ces résultats sont spécifiquement en accord avec ceux de Copenheaver *et al.* (2020) puisque ces derniers ont montré l'absence de tendance généralisable dans les patrons de croissance radiale de cette espèce en réponse aux variations climatiques. Ainsi, à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, il est très probable que la plasticité inhérente à cette espèce lui permette de rester compétitive dans un large éventail de conditions environnementales différentes (Copenheaver *et al.*, 2020). Par conséquent, il semblerait que l'érable à sucre soit l'une des espèces pour laquelle la croissance radiale est la moins réactive aux aléas météorologiques dans la région étudiée. Il est même théoriquement possible que les conditions climatiques futures lui permettent de repousser la limite septentrionale de son aire de répartition vers le Nord si ces dernières y sont favorables (Goldblum & Rigg, 2005 ; Pecl *et al.*, 2017). D'un autre côté, des facteurs non climatiques liés aux propriétés biotiques et abiotiques des sols pourraient empêcher cette migration (Carteron *et al.*, 2020 ; Collin *et al.*, 2018). Par ailleurs, ces observations contredisent les résultats rapportés par Boakye *et al.* (2023) qui suggèrent plutôt l'influence considérable des variations géographiques quant aux tendances de croissance de l'érable à sucre, c'est-à-dire un plus grand déclin de la croissance dans le nord de son aire de répartition, limitant ainsi son expansion vers sa limite nordique de répartition.

Le bouleau blanc est l'autre espèce présente sur les deux sites pour laquelle nous n'avons pas pu établir un lien entre la croissance radiale et les variables hydroclimatiques de l'air et du sol. Comme pour l'érable à sucre, ces résultats suggèrent que, dans la région étudiée, la croissance radiale du bouleau blanc n'est pas dépendante des variables hydroclimatiques que nous avons suivies, mais elle pourrait l'être avec d'autres variables biotiques et abiotiques que nous n'avons pas mesurées. Cependant, cette spéculation est contredite par Bumann *et al.* (2019) qui suggèrent plutôt que la croissance radiale de cette espèce est fortement sensible à une combinaison de la température de l'air et de la disponibilité de l'eau sur l'ensemble de son aire de répartition. De plus, les prédictions pour l'horizon 2041-2070, montrent que

l'habitat du bouleau blanc devrait devenir moins favorable dans la majorité du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune (Périé & Lambert, 2023). Il est possible que cette différence entre les résultats obtenus et la littérature soit due au fait que la compétition interspécifique pour l'accès à la lumière ait été le facteur influençant le plus la croissance radiale du bouleau blanc sur les sites d'étude (Safford *et al.*, 1990 ; Soubeyrand *et al.*, 2024 ; Wang, 1997). En effet, cette espèce est particulièrement intolérante à l'ombre et est facilement remplacée par d'autres espèces plus tolérante (Safford *et al.*, 1990).

5.2 LIMITES DE L'ÉTUDE ET AMÉLIORATIONS POSSIBLES

La méthodologie utilisée lors de cette étude présente plusieurs limites. L'une des limites les plus évidentes de cette étude est le court horizon temporel sur lequel celle-ci a été réalisée, soit un peu plus de trois saisons de croissance. Refaire cette étude, tout en prenant en compte plus de saisons de croissance, semble être nécessaire afin de pouvoir mieux répondre aux questions de cette étude et afin de complètement atteindre l'objectif ainsi que les sous-objectifs ayant été fixés pour celle-ci. Cela permettrait, entre autres, de pouvoir mieux considérer le chêne rouge lors des analyses subséquentes ainsi que de mieux évaluer les effets des variables hydroclimatiques de l'air et du sol sur la croissance radiale de chaque espèce suivie. Par ailleurs, le manque de sites expérimentaux dans la région à l'étude diminue aussi la validité des résultats obtenus. Un plus grand nombre de sites expérimentaux distribués sur une plus grande étendue longitudinale permettrait d'obtenir un portrait écologique plus complet et représentatif de la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune. À noter que ces améliorations permettraient de réduire l'impact des valeurs aberrantes sur les résultats et de mettre en lumière des tendances qui ne sont pas nécessairement observable avec la méthodologie retenue dans le cadre de ce projet.

La portée de cette étude est aussi limitée par l'absence de certaines espèces importantes de l'un des deux sites ou des deux sites entièrement. Par exemple, afin de pouvoir mieux comparer les deux sites entre eux, il aurait été intéressant d'avoir pu suivre quelques érables rouges au site STE ainsi que quelques épinettes blanches et thuyas occidentaux au site SBL. De plus, l'ajout d'espèces importantes telles que le pin rouge (*Pinus resinosa* Aiton), le pin blanc (*Pinus strobus* L.), l'épinette noire et le peuplier à grandes dents permettrait d'obtenir des données plus représentatives de la région à l'étude. L'ajout d'autres espèces de conifères permettrait aussi de meilleures comparaisons entre celles-ci et les feuillus. À noter que l'ajout d'autres sites permettrait potentiellement de suivre un plus grand nombre de frênes noirs et de chênes rouges, voire de pouvoir suivre quelques frênes blancs (*Fraxinus americana* L.) situés à l'extrême limite

nordique de leur aire de répartition (RNCAN, 2021), afin de pouvoir améliorer les comparaisons entre les arbres à pores diffus et les arbres à zones poreuses. De plus, un plus grand nombre de sites répartis sur un plus long gradient nord-sud permettrait aussi de mieux évaluer les effets des aléas météorologiques sur les espèces suivies puisque de nombreuses études montrent que différentes sous-populations d'arbres possèdent différentes adaptations génétiques au climat (Akalusi & Bourque, 2018 ; Eilmann *et al.*, 2014 ; Hackett-Pain *et al.*, 2016 ; Thiel *et al.*, 2014).

De plus, l'absence de relation entre la croissance radiale des arbres et les variables hydroclimatiques de l'air et du sol indiquent que d'autres variables et paramètres biotiques ou abiotiques (radiations solaires, flux d'ozone, acidité du sol, pente, microtopographies, etc.) doivent être pris en compte lors de prochaines études. Il serait notamment intéressant d'étudier les impacts de la compétition intra- et interspécifique sur les différents paramètres de la croissance radiale. Selon Zhang *et al.* (2015a), à une échelle régionale, la compétition est un facteur primaire plus important que le climat en ce qui a trait à la croissance des arbres. Par ailleurs, il serait particulièrement pertinent d'évaluer l'impact qu'a la pédofaune sur la croissance radiale des arbres suivis. En effet, tout en étant sous-représentés dans les modèles actuels, ces organismes sont d'une importance cruciale pour la santé des écosystèmes forestiers, notamment au travers de leur rôle essentiel dans des processus influençant positivement la croissance des végétaux tels que la décomposition de la matière organique, la répartition et la mise en disponibilité des nutriments ainsi que la modulation de la porosité des sols (Briones, 2018 ; Shaw *et al.*, 1991 ; Weston & Whittaker, 2004). D'un autre côté, comme l'ont fait Oogathoo *et al.* (2020), afin de mieux évaluer l'impact qu'a la disponibilité de l'eau sur la croissance radiale des arbres, il serait pertinent de prendre en compte la transpiration de ces derniers en utilisant le transport de la sève comme proxy. Il est aussi possible d'évaluer directement le potentiel hydrique foliaire des arbres (Carrière *et al.*, 2020 ; Urli *et al.*, 2013). Par ailleurs, la division de la saison de croissance de chaque arbre suivi selon le mois et la saison tout en incluant la saison hivernale pourrait être particulièrement pertinente afin de permettre une meilleure caractérisation des différents facteurs pouvant influencer la croissance radiale des arbres.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de caractériser la saison de croissance et documenter les variations intra-annuelles des taux de croissance radiale de différentes espèces arborescentes face à des variations de la température et de la disponibilité de l'eau au cours de trois saisons de croissance complètes. Les arbres à l'étude sont répartis sur deux sites situés intentionnellement au sein d'une zone de transition, c'est-à-dire à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune. Durant la période 2020-2023, le suivi de 62 arbres appartenant à 11 espèces différentes et répartis sur deux sites expérimentaux ainsi que le suivi des conditions hydroclimatiques de l'air et du sol des sites a permis d'aborder des questions relatives aux grands patrons de croissance radiale dans la région étudiée, aux effets des aléas climatiques sur ces derniers ainsi qu'à la plasticité et la résilience des espèces suivies face à ces aléas.

Les résultats obtenus à la suite de la présente étude révèlent de faibles relations entre la croissance radiale des arbres et les diverses variables hydroclimatiques de l'air et du sol. Ils révèlent aussi que la réponse face à une hausse de la température de l'air ainsi qu'à un assèchement du milieu varie selon l'espèce et le groupe fonctionnel. Généralement, les arbres se trouvant au nord et au sud de l'aire de répartition de leur espèce n'ont montré aucune différence significative entre leur croissance radiale. Parmi les quatre espèces présentes sur les deux sites, le bouleau blanc et le érable à sucre sont les seules espèces qui n'ont pas exhibé de lien entre les paramètres de leur croissance radiale et les variables hydroclimatiques suivies. Seul le sapin baumier a montré une différence à la fois au niveau de la durée et de la date de fin de la saison entre les deux sites, notamment une croissance radiale, en moyenne, plus longue et s'étant terminée plus tard sur le site le plus froid et humide. De plus, la croissance radiale, autant au niveau de la saison de croissance que des taux de croissance, des conifères et celle des feuillus ont montré des différences relativement importantes l'une par rapport à l'autre. Cependant, cette tendance n'a pas été observée entre les feuillus à pores diffus et à zones poreuses. De plus, il n'a aussi pas été possible d'observer de différence entre la croissance radiale des espèces pour lesquelles les sites se trouvent à la limite méridionale de leur aire de répartition et celles pour lesquelles les sites se trouvent à la limite septentrionale de leur aire de répartition. D'un autre côté, il a été observé que les conifères sont potentiellement les plus sensibles aux aléas météorologiques dans la région d'étude.

Cependant, la présente étude comporte de nombreuses faiblesses méthodologiques et analytiques qui devront être corrigées dans de futures études. Il est notamment nécessaire d'allonger la période d'étude, d'augmenter le nombre de sites expérimentaux ainsi que de les répartir sur une étendue longitudinale plus importante afin d'améliorer la base de données ainsi que pour réduire l'impact des valeurs extrêmes sur les résultats. La hausse du nombre d'arbres et d'espèces en suivi est aussi nécessaire afin d'améliorer la précision de nos modèles statistiques. De plus, plusieurs de nos résultats montrent que d'autres variables environnementales et paramètres biologiques sont à prendre en compte afin de pouvoir mieux expliquer la croissance radiale des arbres se trouvant à limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune. Malgré tout, les résultats obtenus suggèrent quand même que, à court terme, les changements climatiques futurs n'auront que peu d'impacts sur la croissance radiale de la majorité des espèces arborescentes situées à la limite nord ou sud de leur aire de répartition.

ANNEXE A

TABLEAU A-A : DIAMÈTRES À HAUTEUR DE POITRINE (DHP) DES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.

Site	Placettes	Stations	Espèces	Arbres	DHP [cm]			Élévations [m]	
					2021	2022	2023		
SBL	1	A	FaGr	D1_SF2_6	19,1	22,8	22,8	334,95	
			AcRu	D2_SF1_5	21,9	22,3	22,7	328,06	
			AcRu	SBL1_D3_SF1_6	25,7	25,7	25,7	329,00	
			BeAl	D4_SF2_5	19,5	21,5	21,2	324,42	
		B	AbBa	D5_SF2_2	14,0	15,0	15,1	322,69	
			BeAl	D6_SF1_2	23,5	25,2	25,6	320,16	
			BePa	D7_SF2_11	32,1	32,1	32,1	326,10	
			AcRu	D8_SF2_3	19,3	20,3	20,6	325,47	
		C	BePa	D9_SF1_15	29,9	29,9	30,0	325,13	
			BePa	D10_SF2_15	22,2	22,5	25,1	323,84	
		D	AbBa	D13_SF1_9	18,5	19,7	19,5	324,13	
			AbBa	D14_SF2_9	12,3	13,0	13,2	322,06	
			BePa	SBL1_D15_SF1_7	31,8	33,3	34,0	322,50	
			BePa	D16_SF1.2_8	25,2	27,7	27,5	320,12	
		2	A	AcRu	D1_SF1_5	11,6	13,7	14,5	339,19
				AcRu	D2_SF2_5	11,9	15,3	15,8	340,44
	FaGr			SBL2_D3_SF1_6	15,1	17,9	18,1	341,12	
	BeAl			D4_SF3_2	14,2	18,1	18,1	336,65	
	B		AbBa	D5_SF2_14	12,3	13,0	13,1	332,60	
			AbBa	D6_SF1_16	13,4	13,7	14,4	335,51	
			AcSa	D7_SF2_3	18,8	19,3	20,4	333,97	
			AbBa	D8_SF1_14	13,1	13,9	14,1	326,66	
	C		AcSa	D9_SF1.2_11	35,5	35,5	35,8	333,93	
			AcSa	D10_SF1_10	24,8	23,5	25,5	338,48	
			AcSa	D11_SF2_10	26,9	27,2	27,1	335,67	
			AcSa	D12_SF2_2	36,3	37,7	38,5	338,40	
	D		BeAl	D13_SF3_1	12,6	14,4	20,4	330,99	
			FaGr	D14_SF1.2_8	15,6	16,8	17,0	332,93	
			FaGr	SBL2_D15_SF1_7	13,9	18,0	18,3	331,41	
			FaGr	D16_SF2_7	14,7	18,0	18,7	327,94	
	3	A	QuRu	D1_SF1_16	38,3	39,0	41,5	434,00	
			QuRu	D2_SF1_8	36,4	37,3	37,6	422,00	
			QuRu	D3_SF2_8	34,6	35,6	35,9	417,00	
			QuRu	D4_SF1.2_1	45,1	45,8	47,2	414,00	
		B	QuRu	D5_SF2_16	29,0	29,0	29,8	430,00	
			QuRu	D6_SF3_1	36,2	37,3	38,4	423,00	
QuRu			D7_SF3_2	28,1	29,9	30,2	413,00		
QuRu			D8_SF3_3	41,7	41,8	44,0	415,00		

ANNEXE B

TABLEAU A-B : DIAMÈTRES À HAUTEUR DE POITRINE (DHP) DES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.

Site	Placettes	Stations	Espèces	Arbres	DHP [cm]			Élévations [m]
					2021	2022	2023	
STE	1	A	PoTr	D1_A04	34,3	34,4	34,7	326,00
			PoTr	D2_A05	31,8	31,8	30,7	327,00
			PoTr	D3_A06	29,6	30,4	30,2	325,00
			AbBa	D4_A09	21,8	22,0	21,9	326,00
		B	FrNi	D5_A01	29,3	28,5	28,8	330,00
			FrNi	D6_A02	24,6	25,2	24,4	333,00
			FrNi	D7_A03	19,8	20,0	20,1	329,00
			AbBa	D8_A08	19,1	19,6	18,9	332,00
	2	A	ThOc	D1_B06	25,8	26,5	25,9	354,00
			BePa	D2_B07	31,9	32,7	32,2	358,00
			BePa	D3_B08	29,0	30,0	30,6	354,00
			BePa	D4_B09	20,4	20,4	20,5	356,00
		B	PiGl	D5_B01	63,6	66,3	65,3	358,00
			PiGl	D6_B02	62,2	60,7	60,6	354,00
			ThOc	D7_B04	27,4	27,5	27,6	359,00
			ThOc	D8_B05	55,4	55,9	56,4	354,00
	3	A	BeAl	D1_C01	36,0	36,3	35,3	388,00
			AcSa	D2_C04	25,0	24,2	24,3	387,00
			AcSa	D3_C05	34,6	35,1	34,4	388,00
			AbBa	D4_C08	13,5	13,0	13,0	388,00
		B	BeAl	D5_C02	23,5	24,6	24,4	387,00
			BeAl	D6_C03	20,8	22,3	21,9	388,00
			AcSa	D7_C06	46,5	45,3	47,7	387,00
			AbBa	D8_C09	14,3	14,9	15,1	387,00

ANNEXE C

TABLEAU A-C : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE L'ANNÉE 2020 AINSI QUE SELON LE SITE D'ÉTUDE.

Année	Variables indépendantes	SBL	STE
2020	N_DJCair _(10 °C ; 5 DJC)	95	84
	N_DJCair _(10 °C ; 10 DJC)	41	34
	N_DJCair _(10 °C ; 15 DJC)	5	1
	N_DJCair _(15 °C ; 5 DJC)	41	34
	N_DJCair _(15 °C ; 10 DJC)	5	1
	N_DJCair _(15 °C ; 15 DJC)	0	0
	N_DJCair _(20 °C ; 5 DJC)	5	1
	N_DJCair _(20 °C ; 10 DJC)	0	0
	N_DJCair _(20 °C ; 15 DJC)	0	0
	N_DJCsol _(5 °C ; 2 DJC)	163	154
	N_DJCsol _(5 °C ; 5 DJC)	140	131
	N_DJCsol _(5 °C ; 8 DJC)	122	112
	N_DJCsol _(5 °C ; 10 DJC)	106	100
	N_DJCsol _(10 °C ; 2 DJC)	126	120
	N_DJCsol _(10 °C ; 5 DJC)	106	100
	N_DJCsol _(10 °C ; 8 DJC)	76	71
	N_DJCsol _(10 °C ; 10 DJC)	66	60
	N_DJCsol _(15 °C ; 2 DJC)	83	74
	N_DJCsol _(15 °C ; 5 DJC)	66	60
	N_DJCsol _(15 °C ; 8 DJC)	11	0
	N_DJCsol _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
	N_VPD _{0,50 kPa}	79	75
	N_VPD _{0,70 kPa}	47	39
	N_VPD _{0,80 kPa}	38	27
	N_VPD _{1,0 kPa}	22	10
	N_VPD _{1,5 kPa}	8	0

ANNEXE D

TABLEAU A-D : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L'ANNÉE 2021 AINSI QUE SELON LE SITE D'ÉTUDE.

Année	Date de début moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Date de fin moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Variables indépendantes	SBL	STE
2021	145	207	N_DJCair _(10 °C ; 5 DJC)	52	32
			N_DJCair _(10 °C ; 10 DJC)	17	5
			N_DJCair _(10 °C ; 15 DJC)	1	0
			N_DJCair _(15 °C ; 5 DJC)	17	5
			N_DJCair _(15 °C ; 10 DJC)	1	0
			N_DJCair _(15 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 5 DJC)	1	0
			N_DJCair _(20 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(5 °C ; 2 DJC)	63	63
			N_DJCsol _(5 °C ; 5 DJC)	58	58
			N_DJCsol _(5 °C ; 8 DJC)	47	46
			N_DJCsol _(5 °C ; 10 DJC)	24	25
			N_DJCsol _(10 °C ; 2 DJC)	52	51
			N_DJCsol _(10 °C ; 5 DJC)	24	25
			N_DJCsol _(10 °C ; 8 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(10 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 2 DJC)	3	2
			N_DJCsol _(15 °C ; 5 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 8 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_SMS _{10 kPa}	57	39
			N_SMS _{30 kPa}	41	11
			N_SMS _{60 kPa}	18	0
			N_SMS _{100 kPa}	10	0
			N_VPD _{0,50 kPa}	36	8
			N_VPD _{0,70 kPa}	22	2
			N_VPD _{0,80 kPa}	12	0
			N_VPD _{1,0 kPa}	6	0
			N_VPD _{1,5 kPa}	0	0
			N_VWC _{0 % - 10 %}	0	0
			N_VWC _{10 %}	63	63
			N_VWC _{20 %}	49	31
N_VWC _{30 %}	4	1			
N_VWC _{40 %}	0	0			

ANNEXE E

TABLEAU A-E : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L'ANNÉE 2022 AINSI QUE SELON LE SITE D'ÉTUDE.

Année	Date de début moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Date de fin moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Variables indépendantes	SBL	STE
2022	145	223	N_DJCair _(10 °C ; 5 DJC)	61	46
			N_DJCair _(10 °C ; 10 DJC)	19	8
			N_DJCair _(10 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCair _(15 °C ; 5 DJC)	19	8
			N_DJCair _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCair _(15 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 5 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(5 °C ; 2 DJC)	79	79
			N_DJCsol _(5 °C ; 5 DJC)	79	78
			N_DJCsol _(5 °C ; 8 DJC)	57	52
			N_DJCsol _(5 °C ; 10 DJC)	33	29
			N_DJCsol _(10 °C ; 2 DJC)	71	63
			N_DJCsol _(10 °C ; 5 DJC)	33	29
			N_DJCsol _(10 °C ; 8 DJC)	4	1
			N_DJCsol _(10 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 2 DJC)	15	8
			N_DJCsol _(15 °C ; 5 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 8 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_SMS _{10 kPa}	75	79
			N_SMS _{30 kPa}	59	79
			N_SMS _{60 kPa}	18	34
			N_SMS _{100 kPa}	3	10
			N_VPD _{0,50 kPa}	40	28
			N_VPD _{0,70 kPa}	29	4
			N_VPD _{0,80 kPa}	19	0
			N_VPD _{1,0 kPa}	4	0
			N_VPD _{1,5 kPa}	0	0
			N_VWC _{0 % - 10 %}	4	0
			N_VWC _{10 %}	75	79
			N_VWC _{20 %}	26	79
N_VWC _{30 %}	1	1			
N_VWC _{40 %}	0	0			

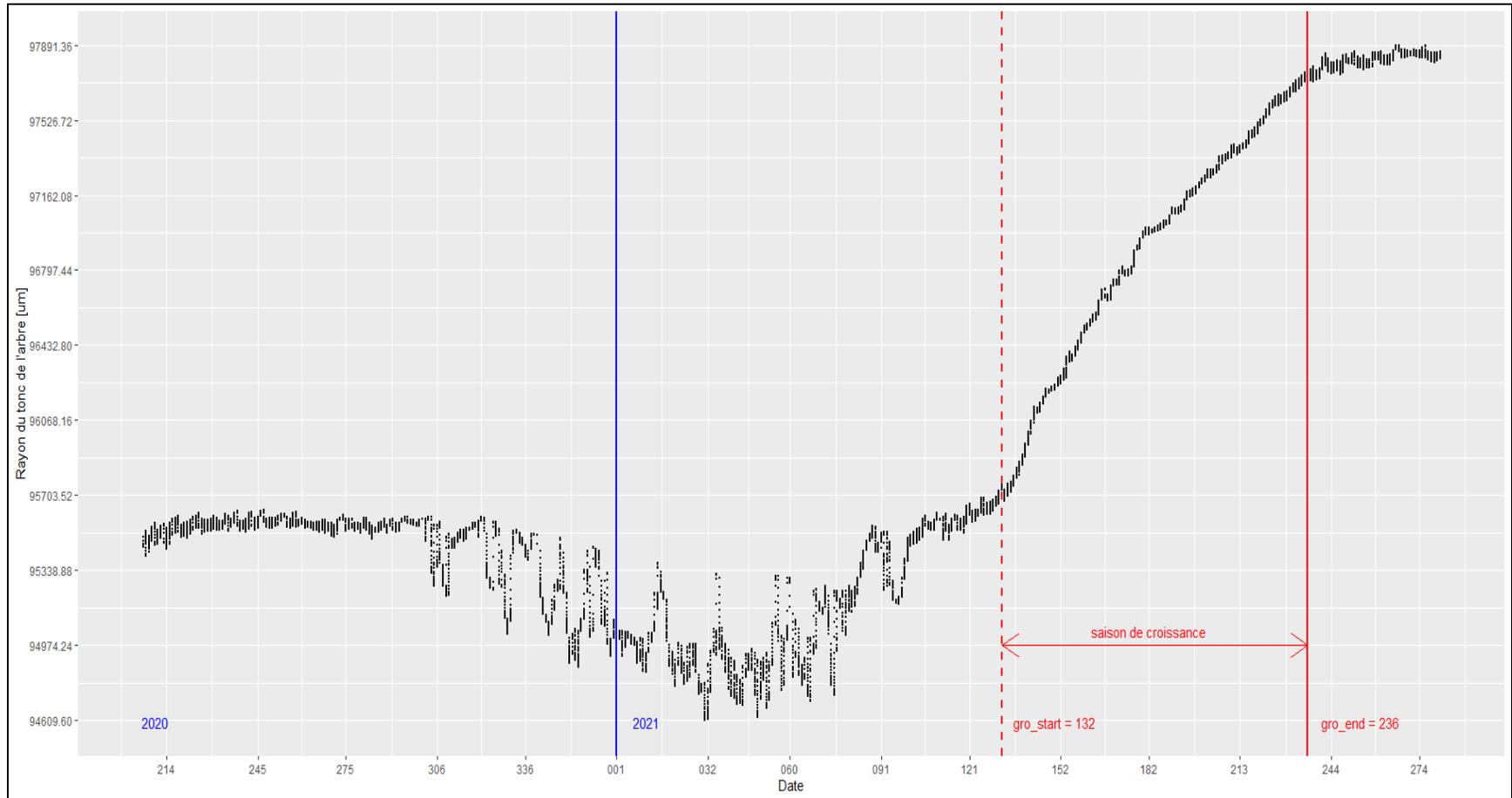
ANNEXE F

TABLEAU A-F : NOMBRE DE JOURS OÙ LES VALEURS DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L'AIR ET DU SOL ÉTAIENT SITUÉES AU-DESSUS DES SEUILS FIXÉS LORS DE LA SAISON DE CROISSANCE DE L'ANNÉE 2023 AINSI QUE SELON LE SITE D'ÉTUDE.

Année	Date de début moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Date de fin moyenne de la saison de croissance [Dates juliennes]	Variables indépendantes	SBL	STE
2023	147	215	N_DJCair _(10 °C ; 5 DJC)	55	50
			N_DJCair _(10 °C ; 10 DJC)	25	12
			N_DJCair _(10 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCair _(15 °C ; 5 DJC)	25	12
			N_DJCair _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCair _(15 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 5 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCair _(20 °C ; 15 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(5 °C ; 2 DJC)	69	69
			N_DJCsol _(5 °C ; 5 DJC)	69	69
			N_DJCsol _(5 °C ; 8 DJC)	54	54
			N_DJCsol _(5 °C ; 10 DJC)	41	35
			N_DJCsol _(10 °C ; 2 DJC)	61	60
			N_DJCsol _(10 °C ; 5 DJC)	41	35
			N_DJCsol _(10 °C ; 8 DJC)	8	3
			N_DJCsol _(10 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 2 DJC)	23	11
			N_DJCsol _(15 °C ; 5 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 8 DJC)	0	0
			N_DJCsol _(15 °C ; 10 DJC)	0	0
			N_SMS _{10 kPa}	49	69
			N_SMS _{30 kPa}	14	69
			N_SMS _{60 kPa}	1	61
			N_SMS _{100 kPa}	0	28
			N_VPD _{0,50 kPa}	26	15
			N_VPD _{0,70 kPa}	16	9
			N_VPD _{0,80 kPa}	14	6
			N_VPD _{1,0 kPa}	8	3
			N_VPD _{1,5 kPa}	3	0
			N_VWC _{0 % - 10 %}	0	0
			N_VWC _{10 %}	69	59
			N_VWC _{20 %}	59	59
N_VWC _{30 %}	0	29			
N_VWC _{40 %}	0	6			

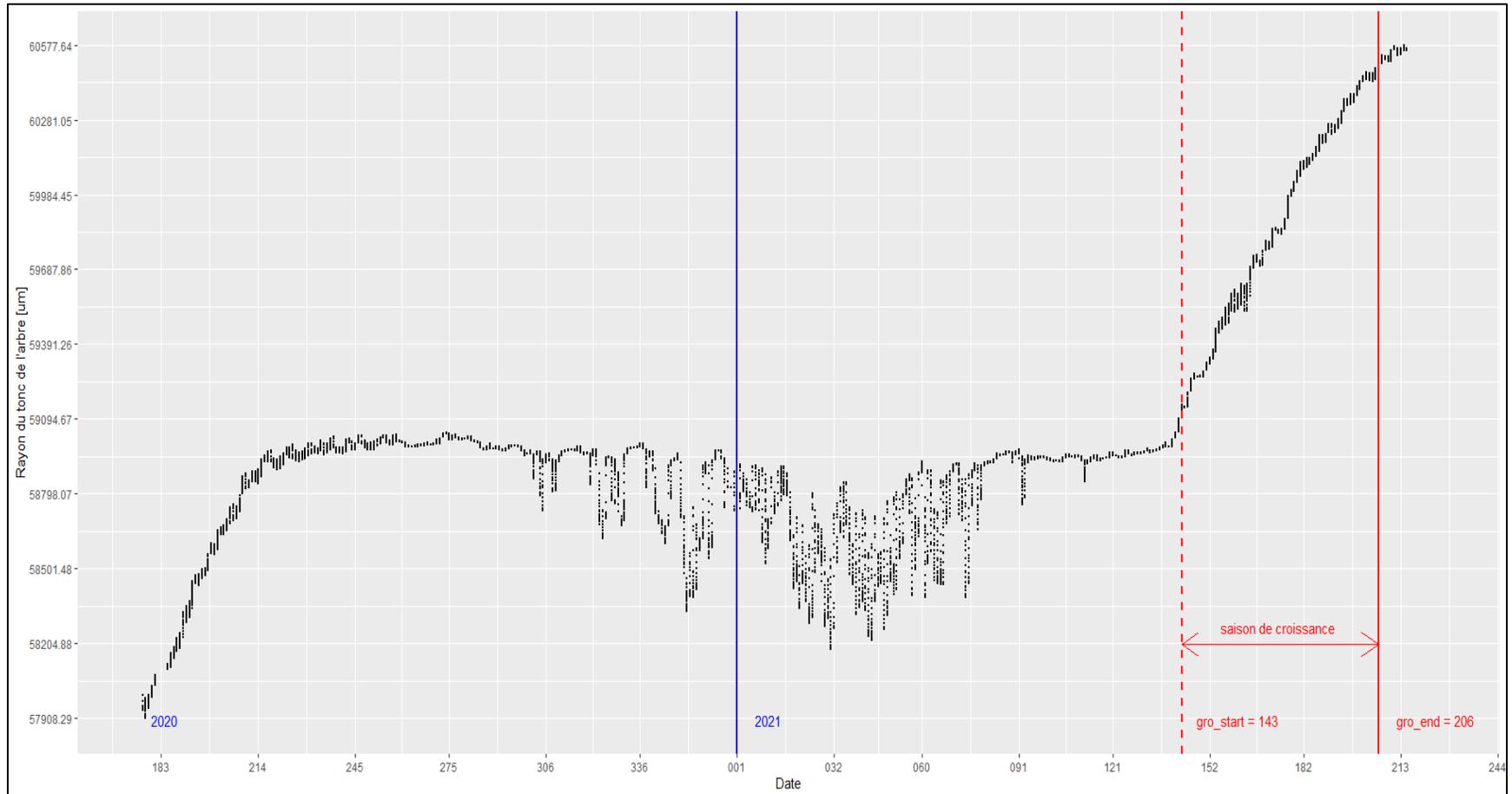
ANNEXE G

FIGURE A-G : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D8_A08 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE SAPIN BAUMIER (AbBa ; *Abies balsamea*).



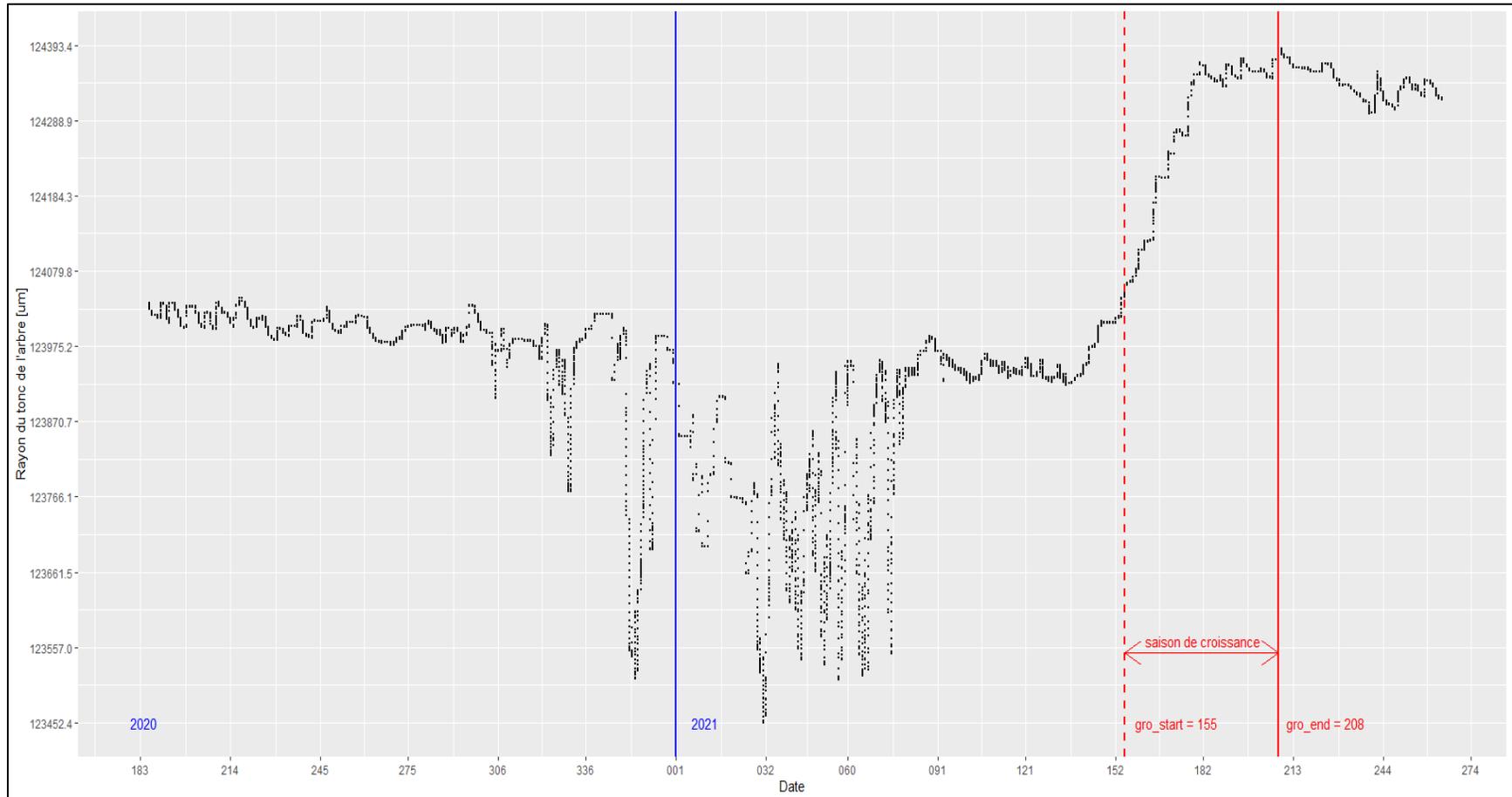
ANNEXE H

FIGURE A-H : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D1_SF1_5 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L'ÉRABLE ROUGE (*AcRu* ; *Acer rubrum*).



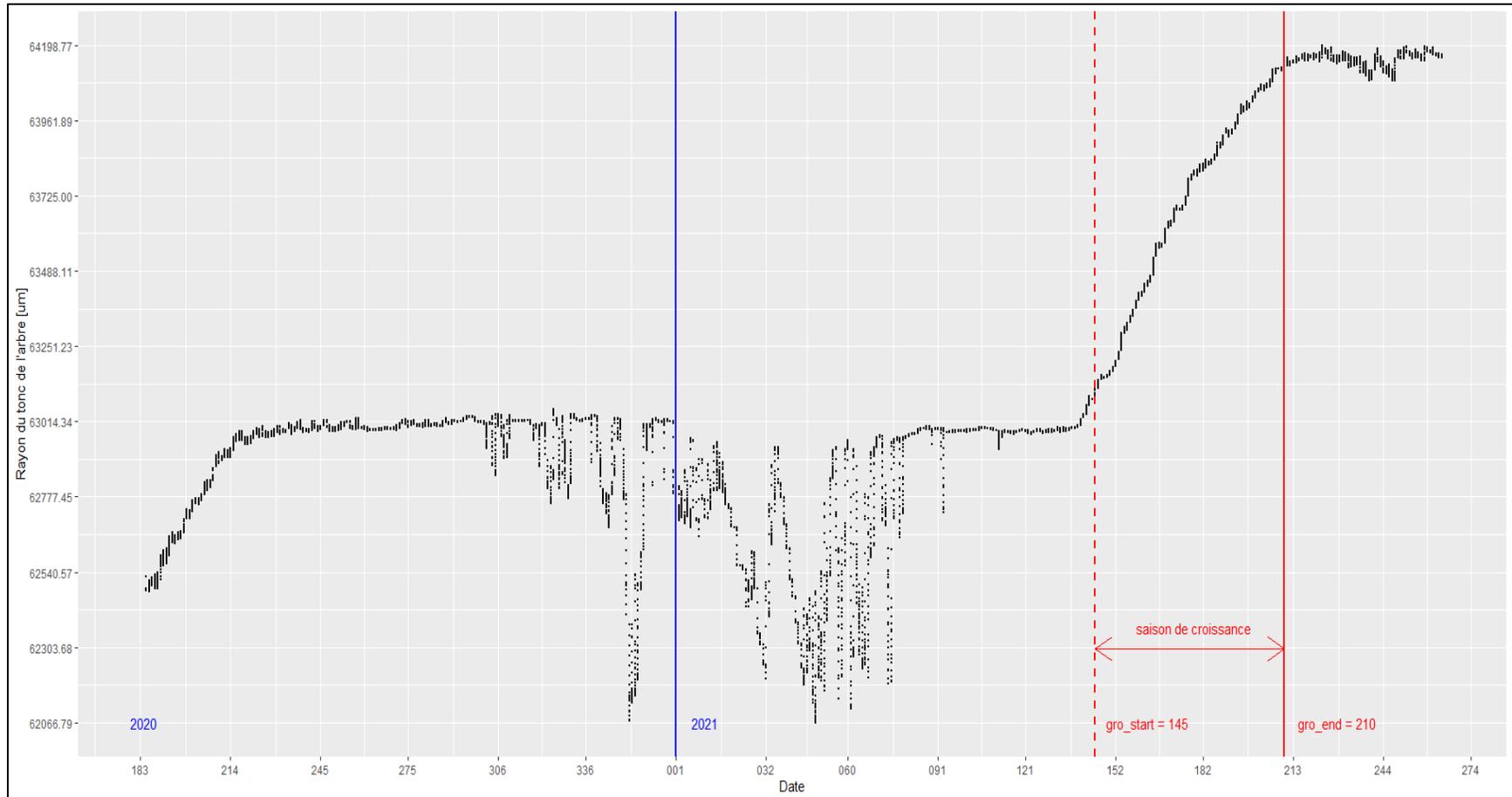
ANNEXE I

FIGURE A-I : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D10_SF1_10 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L'ÉRABLE À SUCRE (*AcSa* ; *Acer saccharum*).



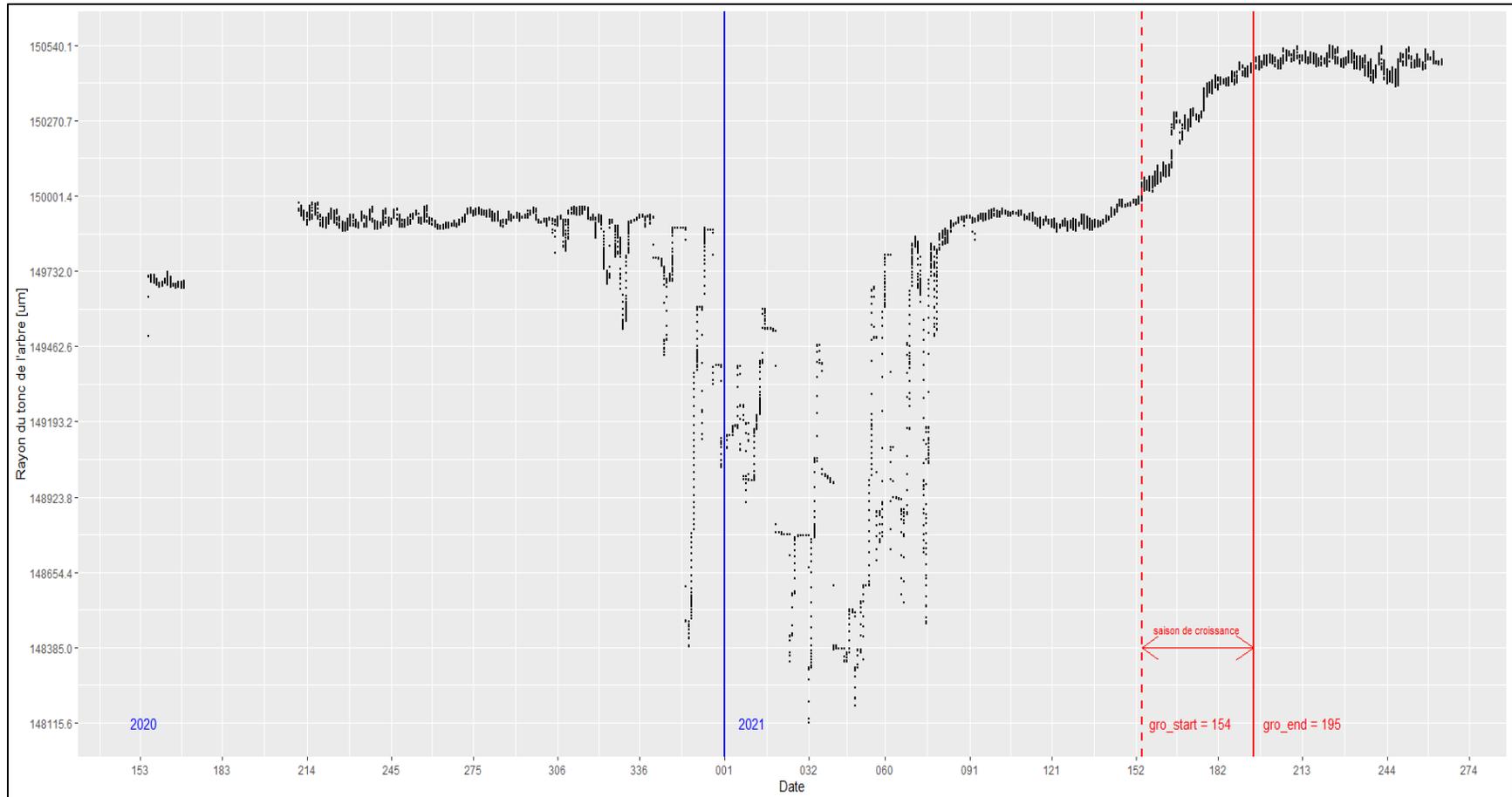
ANNEXE J

FIGURE A-J : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D13_SF3_1 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE BOULEAU JAUNE (BeAl ; *Betula alleghaniensis*).



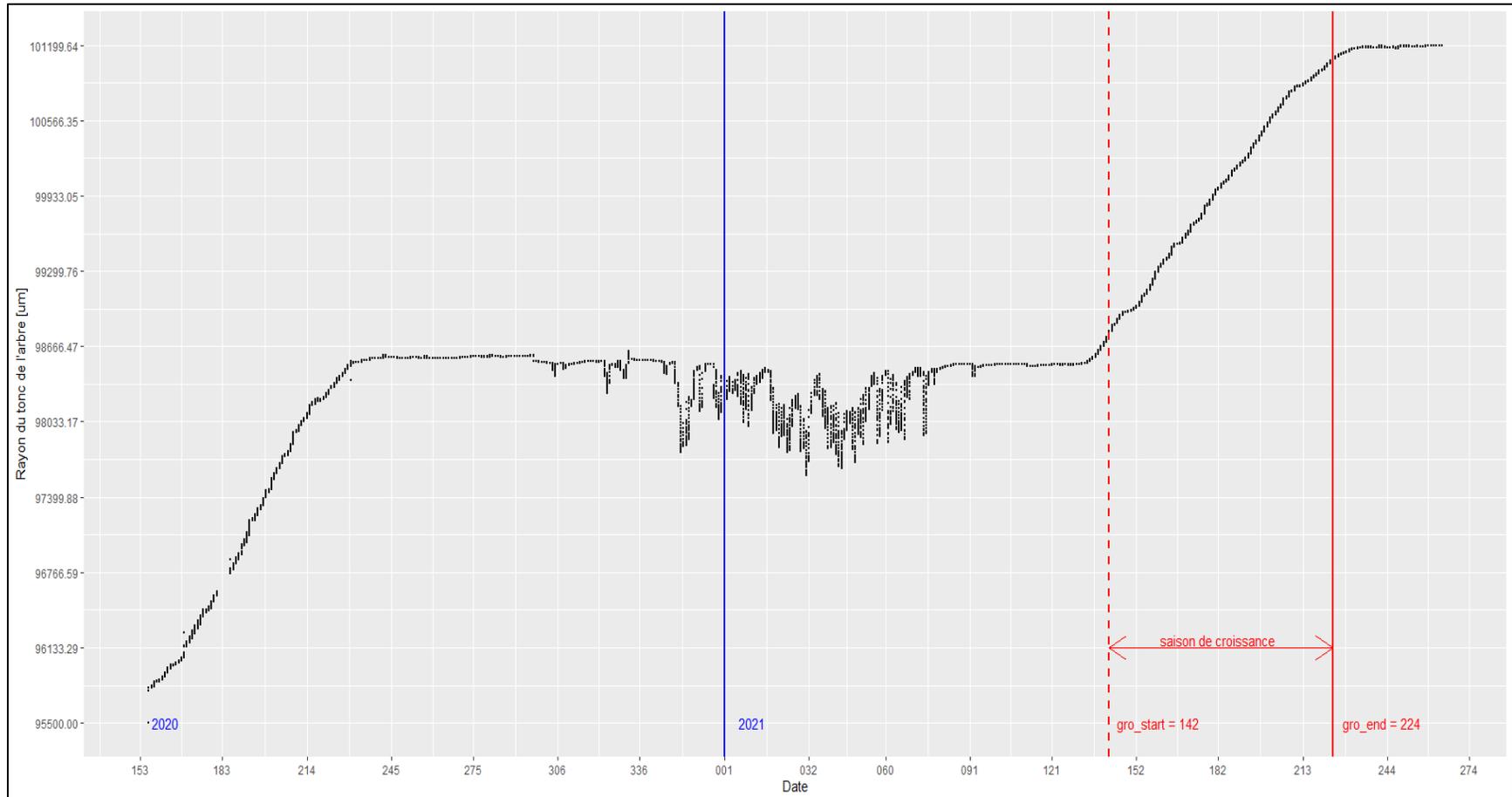
ANNEXE K

FIGURE A-K : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D9_SF1_15 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE BOULEAU BLANC (BePa ; *Betula papyrifera*).



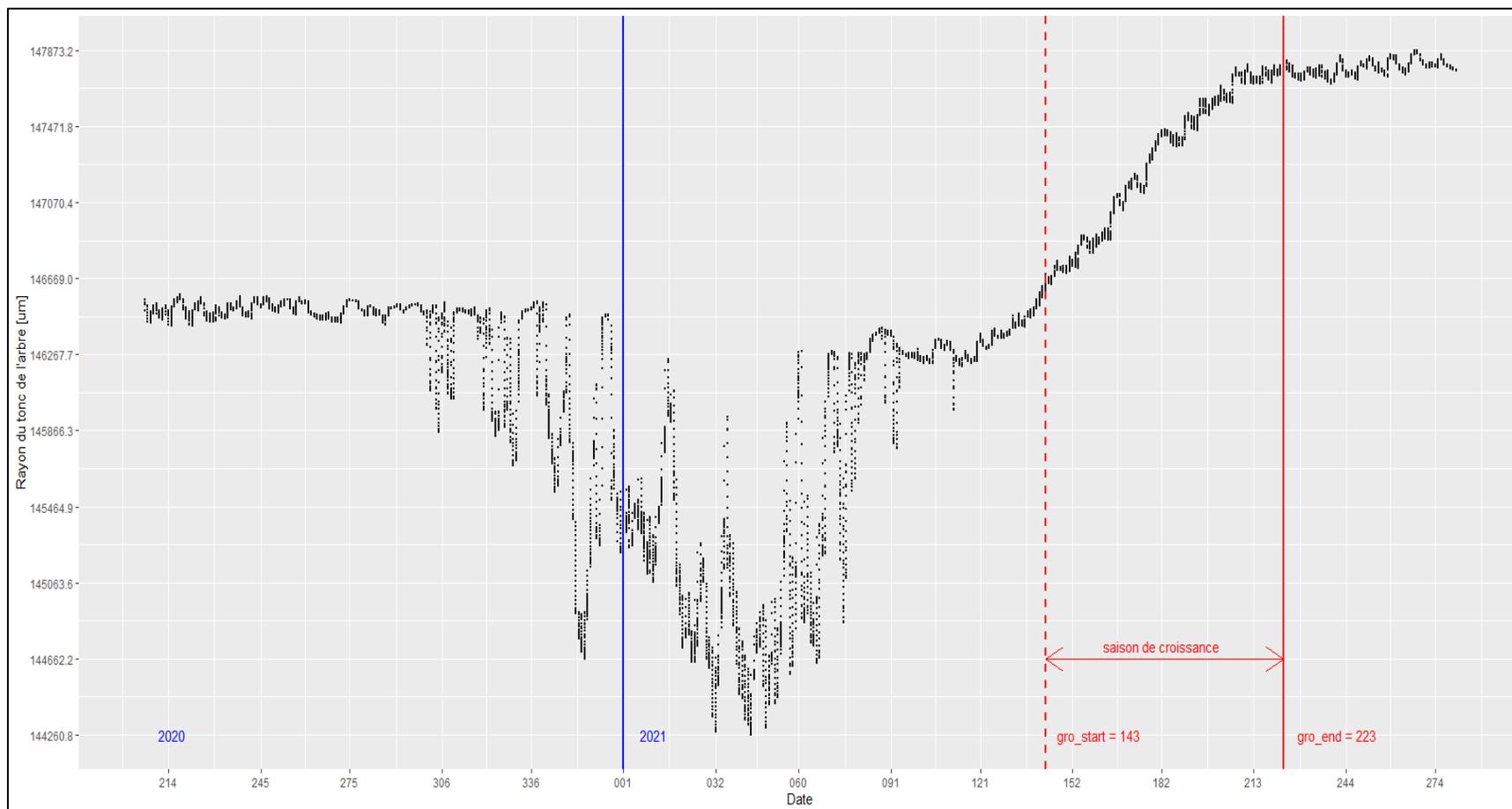
ANNEXE L

FIGURE A-L : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D1_SF2_6 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE HÊTRE À GRANDES FEUILLES (FaGr ; *Fagus grandifolia*).



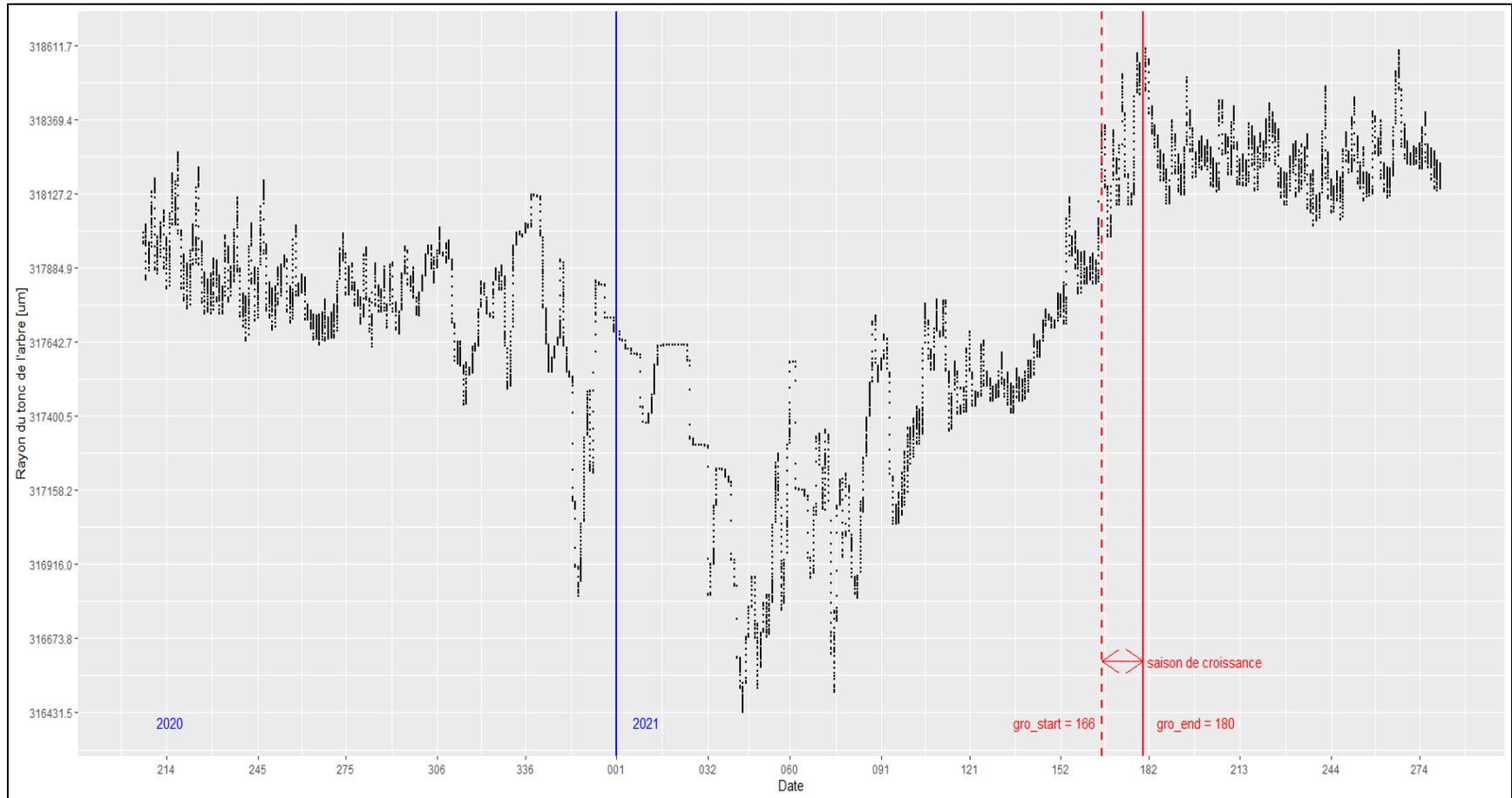
ANNEXE M

FIGURE A-M : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_A01 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE FRÊNE NOIR (*FrNi* ; *Fraxinus nigra*).



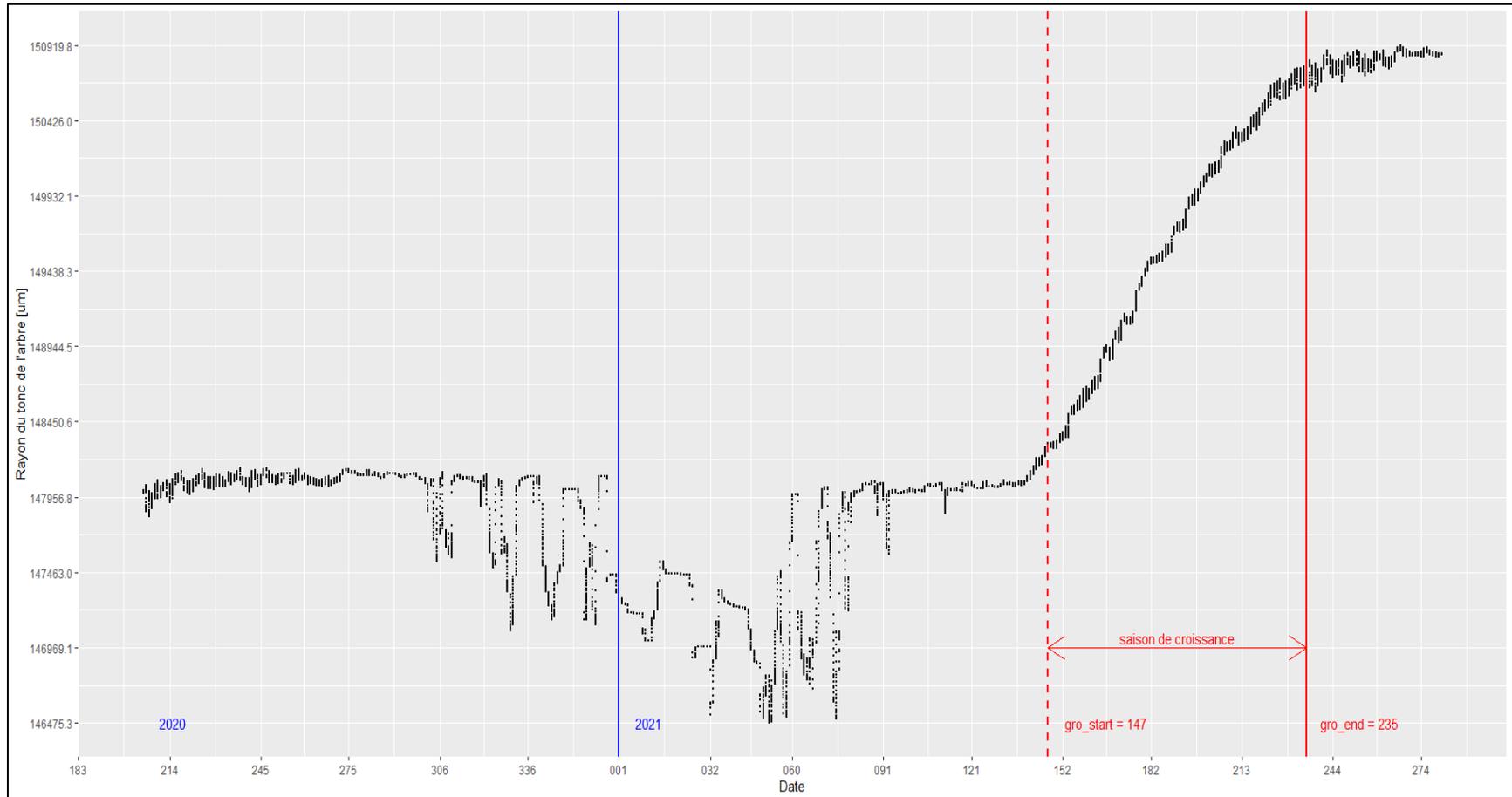
ANNEXE N

FIGURE A-N : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_B01 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR L'ÉPINETTE BLANCHE (PiGI ; *Picea glauca*).



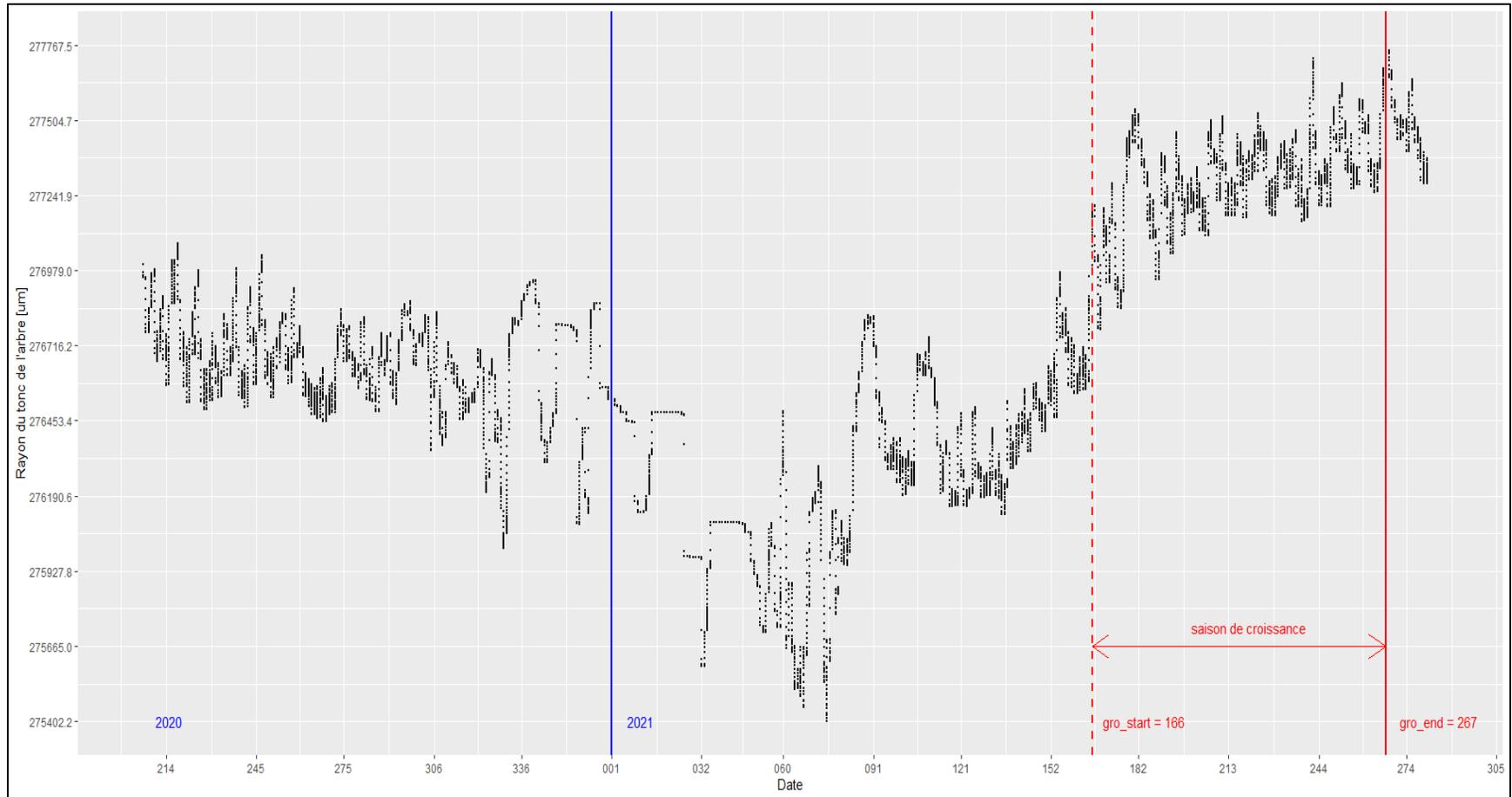
ANNEXE O

FIGURE A-O : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D3_A06 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE PEUPLIER FAUX-TREMBLE (*PoTr* ; *Populus tremuloides*).



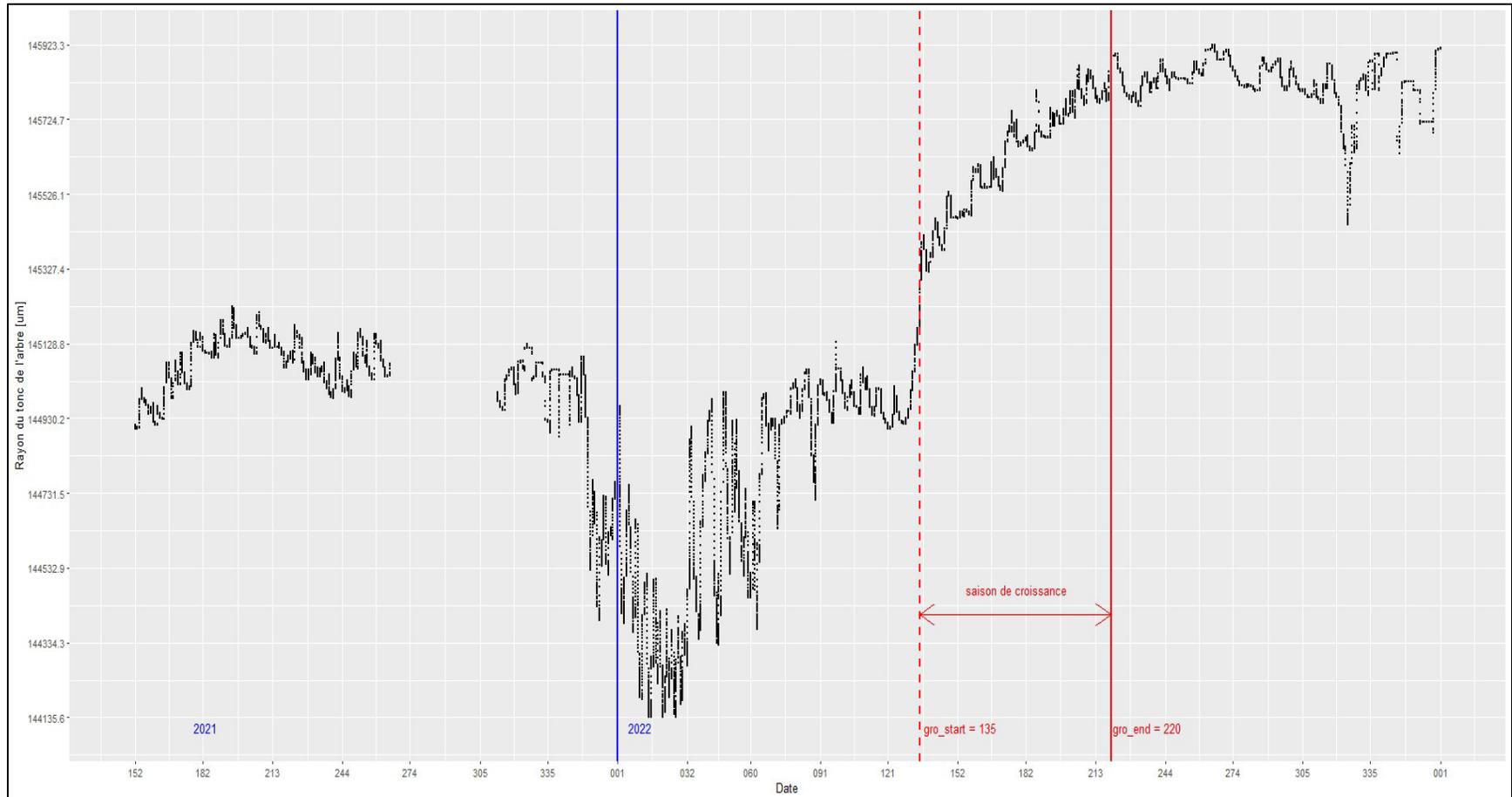
ANNEXE P

FIGURE A-P : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D8_B05 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2021 COMME EXEMPLE POUR LE THUYA OCCIDENTAL (ThOc ; *Thuja occidentalis*).



ANNEXE Q

FIGURE A-Q : COURBE DE CROISSANCE RADIALE DE L'ARBRE D5_SF2_16 AVEC LES DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE DE 2022 COMME EXEMPLE POUR LE CHÊNE ROUGE (QuRu ; *Quercus rubra*).



ANNEXE R

TABLEAU A-R : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2021, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D13_SF1_9	140	178	38	0,60262820	0,09238354	5
	D14_SF2_9	135	177	42	0,60646480	0,05599260	
	D8_SF1_14	137	177	40	0,53248670	0,05486205	
	D5_SF2_14	134	177	43	0,84975310	0,07643305	
	D6_SF1_16	145	177	32	0,48862630	0,06435065	
AcRu	D1_SF1_5	143	206	63	2,35735560	0,13900082	3
	D2_SF1_5	166	180	14	0,14839990	0,07363576	
	D2_SF2_5	140	209	69	3,95795120	0,22256105	
AcSa	D10_SF1_10	155	208	53	0,27445230	0,04036054	4
	D12_SF2_2	143	210	67	1,21534680	0,20705109	
	D7_SF2_3	165	191	26	0,38166240	0,08677341	
	D9_SF1.2_11	154	199	45	0,34280550	0,08502041	
BeAl	D13_SF3_1	145	210	65	1,69071310	0,10310453	3
	D4_SF2_5	143	207	64	1,26471150	0,12293037	
	D4_SF3_2	140	207	67	2,44744920	0,16344233	
BePa	D10_SF2_15	154	178	24	0,03302493	0,1133641	3
	D16_SF1.2_8	154	206	52	0,15881232	1,0420410	
	D9_SF1_15	154	195	41	0,07577658	0,3296592	
FaGr	D1_SF2_6	142	224	82	0,17854602	2,35945000	5
	D14_SF1.2_8	152	190	38	0,05551962	0,42997850	
	D16_SF2_7	59	206	147	0,01246965	0,39787440	
	SBL2_D15_SF1_7	142	214	72	0,22740738	3,74086250	
	SBL2_D3_SF1_6	91	207	116	0,08134938	1,98888050	

ANNEXE S

TABLEAU A-S : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2022, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D13_SF1_9	147	249	102	0,38544950	0,02215902	6
	D14_SF2_9	147	243	96	0,26930130	0,01094369	
	D8_SF1_14	141	174	33	0,31249790	0,03922468	
	D5_SF2_14	141	200	59	0,68504130	0,04531269	
	D6_SF1_16	158	206	48	0,26346430	0,02322675	
	D5_SF2_2	133	205	72	0,95412280	0,06254811	
AcRu	D2_SF1_5	174	222	48	0,06589608	0,00955283	1
AcSa	D10_SF1_10	167	174	7	0,07616828	0,08502527	5
	D12_SF2_2	142	205	63	1,10599738	0,20304154	
	D7_SF2_3	158	205	47	0,63376666	0,07997956	
	D9_SF1.2_11	90	220	130	0,38682733	0,03334236	
	D11_SF2_10	146	205	59	0,43705406	0,06295156	
BeAl	D13_SF3_1	146	220	74	1,89527770	0,10339640	3
	D4_SF2_5	78	219	141	1,68865560	0,07555993	
	D6_SF1_2	155	297	142	1,30617100	0,06858997	
BePa	D16_SF1.2_8	136	234	158	1,12936430	0,12933035	3
	D9_SF1_15	147	222	63	0,27624950	0,02969558	
	SBL1_D15_SF1_7	131	234	75	0,59839050	0,08105633	
FaGr	D1_SF2_6	153	209	56	0,72598330	0,08252199	5
	D14_SF1.2_8	158	220	62	0,89050140	0,07082490	
	D16_SF2_7	154	229	75	0,53659190	0,03310378	
	SBL2_D15_SF1_7	145	220	75	3,40307750	0,20681250	
	SBL2_D3_SF1_6	150	219	69	1,69276350	0,11892508	
QuRu	D1_SF1_16	135	219	84	0,69735790	0,10030666	6
	D4_SF1.2_1	135	221	86	0,56312700	0,09325449	
	D5_SF2_16	135	220	85	0,49464980	0,05308257	
	D6_SF3_1	135	220	85	0,62249960	0,08350656	
	D7_SF3_2	135	219	84	0,61058110	0,06437888	
	D8_SF3_3	133	206	73	0,51037790	0,09162832	

ANNEXE T

TABLEAU A-T : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2023, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE SBL.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D13_SF1_9	150	193	43	0,51735960	0,07084572	5
	D8_SF1_14	136	179	43	0,51365350	0,04963320	
	D5_SF2_14	141	182	41	0,62346520	0,05982988	
	D6_SF1_16	141	183	42	0,52158290	0,05242646	
	D5_SF2_2	159	208	49	0,56495520	0,05498379	
AcRu	D2_SF1_5	168	221	53	0,23477930	0,03083499	1
AcSa	D12_SF2_2	148	208	60	1,08977950	0,21260215	4
	D7_SF2_3	159	192	33	0,48991520	0,08861487	
	D9_SF1.2_11	150	209	59	0,59690190	0,11385783	
	D11_SF2_10	152	187	35	0,32814800	0,08002089	
BeAl	D13_SF3_1	152	210	58	1,39706160	0,09932547	4
	D4_SF2_5	152	215	53	1,32638930	0,13525225	
	D4_SF3_2	152	222	70	1,77285450	0,14745913	
	D6_SF1_2	152	208	56	1,03176700	0,13952214	
BePa	D10_SF2_15	153	203	50	0,15504570	0,02170089	4
	D16_SF1.2_8	135	208	73	0,80972820	0,09000811	
	D9_SF1_15	117	194	77	0,16801320	0,02070223	
	SBL1_D15_SF1_7	151	208	57	0,45782840	0,08102961	
FaGr	D14_SF1.2_8	144	203	59	1,48670000	0,12549940	3
	SBL2_D15_SF1_7	144	215	71	3,49699900	0,23295310	
	SBL2_D3_SF1_6	140	208	68	1,69059900	0,12274690	
QuRu	D1_SF1_16	136	215	79	0,86901050	0,13389112	6
	D2_SF1_8	141	209	68	0,48158060	0,08206617	
	D4_SF1.2_1	141	280	139	0,59578480	0,06140173	
	D6_SF3_1	152	208	56	0,59364370	0,12168317	
	D7_SF3_2	136	215	79	0,89610950	0,10111917	
	D8_SF3_3	136	208	72	0,57364990	0,10497572	

ANNEXE U

TABLEAU A-U : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2021, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D8_A08	132	236	104	2,09347580	0,12108777	3
	D8_C09	120	206	86	2,18567520	0,11444585	
	D4_C08	119	180	61	1,68347720	0,11734202	
AcSa	D2_C04	165	236	71	0,27871370	0,03082509	3
	D3_C05	158	206	48	0,34280550	0,07949971	
	D7_C06	156	196	40	0,32527850	0,11881258	
BeAl	D1_C01	102	241	139	0,45274710	0,03682838	3
	D5_C02	154	217	63	1,34115750	0,15727564	
	D6_C03	151	219	68	1,60832390	0,15471958	
BePa	D2_B07	153	223	70	0,27013440	0,03868103	3
	D3_B08	147	211	64	0,80481180	0,11473337	
	D4_B09	165	265	100	0,35530140	0,02280123	
FrNi	D5_A01	143	223	80	0,81963910	0,09437383	3
	D6_A02	141	206	65	1,73920820	0,20709233	
	D7_A03	146	206	60	0,96139990	0,09967921	
PiGl	D5_B01	166	180	14	0,07614022	0,10874190	2
	D6_B02	172	180	8	0,11577947	0,28296730	
PoTr	D1_A04	165	223	58	0,54098100	0,10047620	3
	D2_A05	155	207	52	0,52912100	0,10170430	
	D3_A06	147	235	88	1,68316100	0,17822190	
ThOc	D1_B06	162	241	79	0,84892290	0,08722650	3
	D7_B04	153	206	53	0,82603650	0,13430945	
	D8_B05	166	267	101	0,23921580	0,04123338	

ANNEXE V

TABLEAU A-V : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2022, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D8_A08	141	248	107	3,02997500	0,17469217	4
	D8_C09	134	183	49	0,73398680	0,06899934	
	D4_C08	136	200	64	0,93731320	0,06337760	
	D4_A09	158	235	77	0,34216180	0,03069733	
AcSa	D2_C04	135	221	86	0,47366450	0,04340250	3
	D3_C05	159	220	61	0,54332804	0,09720815	
	D7_C06	154	234	80	0,37455198	0,06864756	
BeAl	D6_C03	180	225	45	0,56216250	0,08312096	1
BePa	D2_B07	76	234	158	0,37949280	0,02414680	3
	D3_B08	159	222	53	0,89300640	0,13050727	
	D4_B09	159	234	75	0,75513930	0,06485791	
FrNi	D5_A01	136	223	87	0,53698870	0,05739396	3
	D6_A02	137	220	83	1,77578850	0,16975656	
	D3_A03	136	234	98	0,92119140	0,05910783	
PiGl	D5_B01	174	265	91	0,12179379	0,02678934	2
	D6_B02	175	265	90	0,01448567	0,00315191	
PoTr	D1_A04	158	234	76	0,69682140	0,09935768	3
	D2_A05	158	221	63	0,88680670	0,14147851	
	D3_A06	146	229	83	1,94628450	0,22246036	
ThOc	D1_B06	153	235	82	1,28161960	0,12806672	3
	D7_B04	147	220	73	1,28985430	0,15360253	
	D8_B05	174	265	91	0,17010960	0,03260823	

ANNEXE W

TABLEAU A-W : DATES DE DÉBUT (*gro_start*) ET DE FIN (*gro_end*) DE LA SAISON DE CROISSANCE 2023, LES DURÉES (*nbr_day*) DE CETTE DERNIÈRE AINSI QUE LES CROISSANCES RADIALES RELATIVES (CRR ; [%]) ET LES TAUX ABSOLUS DE CROISSANCE RADIALE (TACR ; [mm/jour]) POUR LES ARBRES SUIVIS AU SITE STE.

Espèces	Arbres	<i>gro_start</i> [dates juliennes]	<i>gro_end</i> [dates juliennes]	<i>nbr_day</i> [jours]	CRR [%]	TACR [mm/jour]	N
AbBa	D8_A08	132	246	114	2,76946310	0,15489556	3
	D4_C08	140	191	51	1,29641010	0,11117754	
	D4_A09	140	251	111	0,66380300	0,04145264	
AcSa	D3_C05	96	215	119	0,78340880	0,07227933	1
BeAl	D1_C01	167	207	40	0,21897300	0,06249700	2
	D6_C03	157	215	58	0,59325390	0,06847865	
BePa	D3_B08	156	216	60	0,95476780	0,14797526	2
	D4_B09	163	224	61	0,62324440	0,06635518	
FrNi	D6_A02	133	193	60	1,39601240	0,18804116	2
	D7_A03	151	198	47	0,69911720	0,09451195	
PiGl	D5_B01	167	281	114	0,29145310	0,05124437	2
	D6_B02	123	284	161	0,15997690	0,01946870	
PoTr	D1_A04	157	230	73	0,88692040	0,13267250	3
	D2_A05	152	207	55	1,10293760	0,20346050	
	D3_A06	152	229	77	1,15673020	0,14547820	
ThOc	D1_B06	152	216	64	1,45674050	0,18910713	2
	D8_B05	177	284	107	0,36766170	0,05998827	

ANNEXE X

TABLEAU A-X : VALEURS MOYENNE DES DIFFÉRENTES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES DE L’AIR ET DU SOL (TEMPÉRATURES MOYENNES DE L’AIR (T_{air} , [°C]), DÉFICITS DE PRESSION DE VAPEUR (VPD, [kPa]), TEMPÉRATURES MOYENNES DU SOL (T_{sol} , [°C]), CONTENUS VOLUMÉTRIQUES EN EAU MOYENS DU SOL (VWC, [%]), ET POTENTIELS HYDRIQUES MOYENS DU SOL (SMS, [kPa])) POUR LES SAISONS DE CROISSANCE DE 2021, 2022 ET 2023 SELON LE SITE D’ÉTUDE AINSI QUE LES DIFFÉRENCES ENTRE CES DERNIERS.

Années	Dates juliennes moyennes de début de la saison de croissance	Dates juliennes moyennes de fin de la saison de croissance	Variables	Moyennes		Différences
				SBL	STE	
2021	145	207	T_{air} [°C]	17,501	16,615	0,886
			VPD [kPa]	0,617	0,357	0,260
			T_{sol} [°C]	13,970	13,903	0,067
			VWC [%]	23,051	19,762	3,289
			SMS [kPa]	55,265	16,285	38,980
2022	145	223	T_{air} [°C]	17,493	15,907	1,586
			VPD [kPa]	0,557	0,399	0,158
			T_{sol} [°C]	14,607	14,184	0,423
			VWC [%]	18,175	24,754	6,578
			SMS [kPa]	45,390	65,826	20,435
2023	147	215	T_{air} [°C]	18,035	16,571	1,465
			VPD [kPa]	0,516	0,355	0,161
			T_{sol} [°C]	15,233	14,748	0,486
			VWC [%]	23,120	30,697	7,577
			SMS [kPa]	20,017	91,887	71,870

ANNEXE Y

TABLEAU A-Y : RÉSULTATS ISSUS DES RÉGRESSIONS SÉQUENTIELLES AVEC MÉTHODE ASCENDANTE (RSMA) EXPLIQUANT LA CROISSANCE RADIALE À PARTIR DES VARIABLES INDÉPENDANTES HYDROCLIMATIQUES DES ANNÉES PRÉCÉDENTES. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITÉ (α) EST DE 0,050 ET N EST LE NOMBRE D'ÉCHANTILLONS ANALYSÉS.

Espèces	N	Variables dépendantes	Variables indépendantes ressortantes	R	R ²	P ($\alpha = 0,050$)
AbBa	26	TACR	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACR)	N_DJCSol _(5 °C ; 5 DJC)	0,413	0,171	0,036
			N_VWC _{30 %}	-0,609	0,370	0,007
		CRR	NA	NA	NA	NA
log ₁₀ (CRR)	Sites	0,351	0,592	0,010		
BeAl	16	TACR	N_VWC _{0 % - 10 %}	0,858	0,736	0,001
		CRR	N_VPD _{0,70 kPa}	0,594	0,353	0,015
			Classes de DHP	-0,785	0,617	< 0,001
		log ₁₀ (TACR)	N_VWC _{0 % - 10 %}	0,851	0,724	< 0,001
			N_SMS _{100 kPa}	-0,648	0,420	0,043
			Classes de DHP	0,947	0,897	0,011
		log ₁₀ (CRR)	N_VPD _{0,50 kPa}	0,771	0,594	0,019
			N_VPD _{0,70 kPa}	0,815	0,663	0,006
			N_VWC _{20 %}	0,609	0,371	0,011
			N_VWC _{30 %}	0,846	0,716	0,023
Classes de DHP	-0,723	0,523	0,002			
AcSa	20	TACR	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACR)	NA	NA	NA	NA
		CRR	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (CRR)	NA	NA	NA	NA
BePa	18	TACR	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (TACR)	NA	NA	NA	NA
		CRR	NA	NA	NA	NA
		log ₁₀ (CRR)	NA	NA	NA	NA

* Variable indépendante prenant le dessus lorsque toutes les variables indépendantes sont testées dans une RSMA.

RÉFÉRENCES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (s. d.). *Degrés-jours de croissance*. Gouvernement du Canada. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/c7b40829-bacb-4f67-a19b-e090b3d32992>
- Akalusi, M.E. et Bourque, C.P.-A. (2018). Effect of climatic variation on the morphological characteristics of 37-year-old balsam fir provenances planted in a common garden in New Brunswick, Canada. *Ecology and Evolution*, 8(6), 3208-3218. DOI : 10.1002/ece3.3852
- Ameray, A. ; Cavard, X. et Bergeron, Y. (2023). Climate change may increase Quebec boreal forest productivity in high latitudes by shifting its current composition. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1020305. DOI : 10.3389/ffgc.2023.1020305
- Asbjornsen, H. ; Goldsmith, G.R. ; Alvarado-Barrientos, M.S. ; Rebel, K. ; van Osch, F.P. ; Rietkerk, M. ; Chen, J. ; Gotsch, S. ; Tobón, C. ; Geissert, D.R. ; Gómez-Tagle, A. ; Vache, K. et Dawson, T.E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1-2), 3-22. DOI : 10.1093/jpe/rtr005
- Auzel, P. ; Gaonac’h, H. ; Poisson, F. ; Siron, R. ; Calmé, S. ; Belanger, M. ; Bourassa, M.M. ; Kestrup, A. ; Cuerrier, A. ; Downing, A. ; Lavallée, C. ; Pelletier, F. ; Chambers, J. ; Gagnon, A.E. ; Bedard, M.C. ; Gendreau, Y. ; Gonzalez, A. ; Mitchell, M. ; Whiteley, J. et Larocque, A. (2012). *Impacts of Climate Change on the Biodiversity of Quebec: Literature review summary*. Ouranos, Centre de la science de la biodiversité du Québec (CSBQ) et Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs (MDDP).
- Babst, F. ; Bouriaud, O. ; Papale, D. ; Gielen, B. ; Jassens, I.A. ; Nikinmaa, E. ; Ibrom, A. ; Wu, J. ; Bernhofer, C. ; Köstner, B. ; Grünwald, T. ; Seufert, G. ; Ciais, P. et Frank, D. (2014). Above-ground woody carbon sequestration measured from tree rings is coherent with net ecosystem productivity at five eddy-covariance sites. *New Phytologist*, 2014(4), 1289-1303. DOI : 10.1111/nph.12589
- Bader, M.K.-F. ; Scherrer, D. ; Zweifel, R. et Körner, C. (2022). Less pronounced drought responses in ring-porous than diffuse-porous temperate tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109184. DOI : 10.1016/j.agrformet.2022.109184
- Becker, P. ; Tyree, M.T. et Tsuda, M. (1999). Hydraulic conductances of angiosperms versus conifers: similar transport sufficiency at the whole-plant level. *Tree Physiology*, 19(7), 445-452. DOI : 10.1093/treephys/19.7-445
- Beil, I. ; Kreyling, J. ; Meyer, C. ; Lemcke, N. et Malyshev, A.V. (2021). Late to bed, late to rise – Warmer autumn temperatures delay spring phenology by delaying dormancy. *Global Change Biology*, 27(22), 5806-5817. DOI : 10.1111/gcb.15858
- Bélanger, N. ; Collin, A. ; Khelifa, R. et Lebel-Desrosiers, S. (2021). Balsam Fir and American Beech Influence Soil Respiration Rates in Opposite Directions in a Sugar Maple Forest Near Its Northern Range Limit. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 664584. DOI : 10.3389/ffgc.2021.664584

- Bélanger, N. ; Côté, B. ; Fyles, J.W. ; Courchesne, F. et Hendershot, W.H. (2004). Forest regrowth as the controlling factor of soil nutrient availability 75 years after fire in a deciduous forest of Southern Quebec. *Plant and Soil*, 262, 363-272. DOI : 10.1023/B:PLSO.0000037054.21561.85
- Bélanger, N. ; Holmden, C. ; Courchesne, F. ; Côté, B. et Hendershot, W.H. (2012). Constraining soil mineral weathering $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for calcium apportionment studies of a deciduous forest growing on soils developed from granitoid igneous rocks. *Geoderma*, 185-186, 84-86. DOI : 10.1016/j.geoderma.2012.03.024
- Bélanger, N. et Chaput-Richard, C. (2023). Experimental Warming of Typically Acidic and Nutrient-Poor Boreal Soils Does Not Affect Leaf-Litter Decomposition of Temperate Deciduous Tree Species. *Soil Systems*, 7(1), 14. DOI : 10.3390/soilsystems7010014
- Benabdallah, B. ; Lévesque, Y. ; Ouellet, É. et Tardif, G. (1996). Chapitre 30 – Structure de la matière ligneuse. Dans J.A. Bérard et M. Côté (dir.), *Manuel de foresterie* (p. 1275-1296). Les Presses de l'Université Laval.
- Berteaux, D. ; Casajus, N. ; de Blois, S. et Logan, T. (2014). Chapitre 2 : Les climats du Québec. Dans D. Berteaux, N. Casajus et S. de Blois (dir.), *Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel* (p. 29-47). Presse de l'Université du Québec.
- Berteaux, D. ; de Blois, S. ; Angers, J.-F. ; Bonin, J. ; Casajus, N. ; Darveau, M. ; Fournier, F. ; Humphries, M.M. ; McGill, B. ; Larivée, J. ; Logan, T. ; Nantel, P. ; Périé, C. ; Poisson, F. ; Rodrigue, D. ; Rouleau, S. ; Siron, R. ; Thuiller, W. et Vescovi, L. (2010). The CC-Bio Project: Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity*, 2(11), 1181-1204. DOI : 10.3390/d2111181
- Bigelow, S.W. ; Runkle, J.R. et Oswald, E.M. (2020). Competition, Climate, and Size Effects on Radial Growth in an Old-Growth Hemlock Forest. *Forests*, 11(1), 52. DOI : 10.3390/f11010052
- Boakye, E.A. ; Bergeron, Y. ; Drobyshev, I. ; Beekharry, A. ; Voyer, D. ; Achim, A. ; Huang, J.-G. ; Grondin, P. ; Bédard, S. ; Havreljuk, F. ; Gennaretti, F. et Girardin, M.P. (2023). Recent decline in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) growth extend to the northern parts of its distribution range in eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, 545, 121304. DOI : 10.1016/j.foreco.2023.121304
- Boisvert-Marsh, L. ; Pedlar, J.H. ; de Blois, S. ; Le Squin, A. ; Lawrence, K. ; McKenney, D.W. ; Williams, C. et Aubin, I. (2022). Migration-based simulations for Canadian trees show limited tracking of suitable climate under climate change. *Diversity and Distributions*, 28(11), 2330-2348. DOI : 10.1111/ddi.13630
- Bonan, G.B. (2008). Forest and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. DOI : 10.1126/science.1155121
- Bonsal, B.R. ; Peters, D.L. ; Seglenieks, F. ; Rivera, A. et Berg, A. (2019). Chapitre 6 : Évolution de la disponibilité de l'eau douce à l'échelle du Canada. Dans E. Bush et D.S. Lemmen (dir.), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (p. 262-342). Gouvernement du Canada.

- Bošel'a, M. ; Sedmák, R. ; Sedmáková, D. ; Marušák, R. et Kulla, L. (2014). Temporal shifts in climate-growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management*, 325, 108-117. DOI : 10.1016/j.foreco.2014.03.055
- Boulanger, Y. ; Pascual, J. ; Bouchard, M. ; D'Orangeville, L. ; Périé, C. et Girardin, M.P. (2021). Multi-model projections of tree species performance in Quebec, Canada, under future climate change. *Global Change Biology*, 28(5), 1884-1902. DOI : 10.1111/gcb.16014
- Boulanger, Y. ; Puigdevall, J.P. ; Bélisle, A.C. ; Bergeron, Y. ; Brice, M.-H. ; Cyr, D. ; De Grandpré, L. ; Fortin, D. ; Gauthier, S. ; Grondin, P. ; Labadie, G. ; Leblond, M. ; Marchand, M. ; Splawinski, T.B. ; St-Laurent, M.-H. ; Thiffault, E. ; Tremblay, J.A. et Yamasaki, S.H. (2023). A regional integrated assessment of impacts of climate change and of the potential adaptation avenues for Quebec's forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(8), 556-578. DOI : 10.1139/cjfr-2022-0282
- Briones, M.J.I. (2018). The Serendipitous Value of Soil Fauna in Ecosystem Functioning: The Unexplained Explained. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 149. DOI : 10.3389/fenvs.2018.00149
- Brodribb, T.J. (2020). Learning from a century of droughts. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1007-1008. DOI : 10.1038/s41559-020-1226-2
- Brodribb, T.J. ; Holbrook, N.M. et Hill, R.S. (2005). Seedling growth in conifers and angiosperms: impacts of contrasting xylem structure. *Australian Journal of Botany*, 53, 749-755. DOI : 10.1071/BT05049
- Bumann, E. ; Awada, T. ; Wardlow, B. ; Hayes, M. ; Okalebo, J. ; Helzer, C. ; Mazis, A. ; Hiller, J. et Cherubini, P. (2018). Assessing responses of *Betula papyrifera* to climate variability in a remnant population along the Niobrara River Valley in Nebraska, U.S.A., through dendroecological and remote-sensing techniques. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(5), 423-433. DOI : 10.1139/cjfr-2018-0206
- Buttó, V. ; Millan, M. ; Rossi, S. et Delagrangé, S. (2021). Contrasting Carbon Allocation Strategies of Ring-Porous and Diffuse-Porous Species Converge Toward Similar Growth Responses to Drought. *Frontiers in Plant Science*, 12, 760859. DOI : 10.3389/fpls.2021.760859
- Carrière, S.D. ; Martin-St-Paul, N.K. ; Cakpo, C.B. ; Patris, N. ; Gillon, M. ; Chalikakis, K. ; Doussan, C. ; Olioso, A. ; Babic, M. ; Jouineau, A. ; Simioni, G. et Davi, H. (2020). The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings – Insights from isotopic tracing and leaf water potential. *Science of the Total Environment*, 699, 134332. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2019.134332
- Carteron, A. ; Parasquive, V. ; Blanchard, F. ; Guilbeault-Mayers, X. ; Turner, B.L. ; Vellend, M. et Laliberté, E. (2020). Soil abiotic and biotic properties constrain the establishment of dominant temperate tree into boreal forests. *Journal of Ecology*, 108(3), 931-944. DOI : 10.1111/1365-2745.13326
- Charra-Vaskou, K. ; Badel, E. ; Charrier, G. ; Ponomarenko, A. ; Bonhomme, M. ; Foucat, L. ; Mayr, S. et Améglio, T. (2015). Cavitation and water fluxes driven by ice water potential in *Juglans regia* during freeze-thaw cycles. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 736-750. DOI : 10.1093/jxb/erv486

- Cholet, C. ; Houle, D. ; Sylvain, J.-D. ; Doyon, F. et Maheu, A. (2022). Climate Change Increases the Severity and Duration of Soil Water Stress in the Temperate Forest of Eastern North America. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 879382. DOI : 10.3389/ffgc.2022.879382
- Collier, J. ; MacLean, D.A. ; D'Orangeville, L. et Taylor, A.R. (2022). A review of climate change effects on the regeneration dynamics of balsam fir. *The Forestry Chronicle*, 98(1), 54-65. DOI : 10.5558/tfc2022-005
- Collin, A. ; Messier, C. ; Kembel, S.W. et Bélanger, N. (2017). Low Light Availability Associated with American Beech Is the Main Factor for Reduced Sugar Maple Seedling Survival and Growth Rates in a Hardwood Forest of Southern Quebec. *Forest*, 8(11), 413. DOI : 10.3390/f8110413
- Collin, A. ; Messier, C. ; Kembel, S.W. et Bélanger, N. (2018). Can sugar maple establish into the boreal forest? Insights from seedlings under various canopies in southern Quebec. *Ecosphere*, 9(1), e02022. DOI : 10.1002/ecs2.2022
- Copenheaver, C.A. ; Shumaker, K.L. ; Butcher, B.M. ; Hahn, G.E. ; Perkins, L.P.J. ; Dukes, C.J. ; Thompson, E.G. et Pisaric, M.F.J. (2020). Dendroclimatology of sugar maple (*Acer saccharum*): Climate-growth response in a late-successional species. *Dendrochronologia*, 63, 125747. DOI : 10.1016/j.dendro.2020.125747
- D'Orangeville, L. ; Houle, D. ; Duchesne, L. ; Phillips, R.P. ; Bergeron, Y. et Kneeshaw, D. (2018). Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications*, 9, 3213. DOI : 10.1038/s41467-018-05705-4
- D'Orangeville, L. ; Itter, M. ; Kneeshaw, D. ; Munger, J.W. ; Richardson, A.D. ; Dyer, J.M. ; Orwing, D.A. ; Pan, Y. et Pederson, N. (2022). Peak radial growth of diffuse-porous species occurs during periods of lower water availability than for ring-porous and coniferous trees. *Tree Physiology*, 42(2), 304-316. DOI : 10.1093/treephys/tpab101
- Davi, H. ; Gillmann, M. ; Ibanez, T. ; Cailleret, M. ; Bontemps, A. ; Fady, B. et Lefèvre, F. (2011). Diversity of leaf unfolding dynamics among tree species: New insights from a study along an altitudinal gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1504-1513. DOI : 10.1016/j.agrformet.2011.06.008
- de Luis, M. ; Čufar, K. ; Di Filippo, A. ; Novak, K. ; Papadopoulos, A. ; Piovesan, G. ; Rathgeber, C.B.K. ; Raventós, J. ; Saz, M.A. et Smith, K.T. (2013). Plasticity in Dendroclimatic Response across the Distribution Range of Aleppo Pine (*Pinus halepensis*). *PLOS One*, 9(1), e83550. DOI : 10.1371/journal.pone.0083550
- Derksen, C. ; Burgess, D. ; Duguay, C. ; Howell, S. ; Mudryk, L. ; Smith, S. ; Thackeray, C. et Kirchmeier-Young, M. (2019). Chapitre 5 : Évolution de la neige, de la glace et du pergélisol à l'échelle du Canada. Dans E. Bush et D.S. Lemmen (dir.), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (p. 195-260). Gouvernement du Canada.
- Deslauriers, A. ; Morin, H. ; Urbinati, C. et Carrer, M. (2003). Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). *Trees*, 17, 477-484. DOI : 10.1007/s00468-003-0260-4

- Deslauriers, A. ; Rossi, S. et Anfodillo, T. (2007). Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia*, 25(2), 113-124. DOI : 10.1016/j.dendro.2007.05.003
- Direction de la recherche forestière (DRF). (2017). *Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution* (Avis scientifique). Direction de la recherche forestière (DRF), Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3081458>
- Direction des inventaires forestiers (DIF). (2022). *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec* (Publication n° F24-06-2011). Direction des inventaires forestiers (DIF), Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF). https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/FE_zones_vegetation_bioclimatiques_MRNF.pdf
- Duchesne, L. ; Domaine, É. ; Schab, A. et D'Orangeville, L. (2020). *Sensibilité de la croissance radiale des arbres en forêt boréale en réponse aux sécheresses ponctuelles et à la variabilité interannuelle du bilan hydrique climatique* (Mémoire de recherche forestière n° 185). Direction de la recherche forestière (DRF), Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4201954>
- Duchesne, L. ; Houle, D. et D'Orangeville, L. (2012). Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Quebec, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162-163, 108-114. DOI : 10.1016/j.agrformet.2012.04.016
- Duchesne, L. ; Moore, J.-D. et Ouimet, R. (2006). Envahissement du hêtre dans les érablières déperissantes au Québec. *Le Naturaliste canadien*, 130(1), 56-59. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Nat-can-130-1-56-59.pdf>
- Duchesne, L. et Houle, D. (2011). Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) from daily climate. *Forest Ecology and Management*, 262(5), 863-872. DOI : 10.1016/j.foreco.2011.05.027
- Ecomatik. (2019). *Circumference Dendrometer (Type DC3): For measuring changes in the circumference of plant stems. User Manual*. Ecomatik GmbH, Dachau, Allemagne. <https://ecomatik.de/>
- Eilmann, B. ; Sterck, F. ; Wegner, L. ; de Vries, S.M.G. ; von Arx, G. ; Mohren, G.M.J. ; den Ouden, J. et Sass-Klaassen, U. (2014). Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree Physiology*, 34(8), 882-893. DOI : 10.1093/treephys/tpu069
- Eitel, J.U.H. ; Basler, D. ; Braun, S. ; Buchmann, N. ; D'Odorico, P. ; Etzold, S. ; Gessler, A. ; Griffin, K.L. ; Krejza, J. ; Luo, Y. ; Maguire, A.J. ; Rao, M.P. ; Vitasse, Y. ; Walthert, L. et Zweifel, R. (2023). Toward monitoring stem growth phenology from space with high resolution satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, 109549. DOI : 10.1016/j.agrformet.2023.109549
- Erdmann, G.G. (1990). *Betula alleghaniensis* Britton. Yellow Birch. Dans R.M. Burns et B.H. Honkala (dir.), *Silvics of North America. Volume 2: Hardwoods* (p. 290-323). United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Agriculture Handbook 654.

- Etzold, S. ; Sterck, F. ; Bose, A.K. ; Braun, S. ; Buchmann, N. ; Eugster, W. ; Gessler, A. ; Kahmen, A. ; Peters, R.L. ; Vitasse, Y. ; Walthert, L. ; Ziemińska, K. et Zweifel, R. (2021). Number of growth days and not length of the growth period determines radial stem growth of temperate trees. *Ecology Letters*, 25(2), 427-439. DOI : 10.1111/ele.13933
- Fiducie de conservation des écosystèmes de Lanaudière (FiCEL). (s. d.). *Derrière la cabane, du bas vers le haut de la pente* [Document Word, document non publié]. Fiducie de conservation des écosystèmes de Lanaudière (FiCEL).
- Forrester, D.I. ; Limousin, J.-M. et Pfautsch, S. (2022). The relationship between tree size and tree water-use: is competition for water size-symmetric or size-asymmetric? *Tree Physiology*, 42(10), 1916-1927. DOI : 10.1093/treephys/tpac018
- Gheyret, G. ; Zhang, H.-T. ; Guo, Y. ; Liu, T.-Y. ; Bai, Y.-H. ; Li, S. ; Schmid, B. ; Bruelheide, H. ; Ma, K. et Tang, Z. (2021). Radial growth response of trees to seasonal soil humidity in a subtropical forest. *Basic and Applied Ecology*, 55, 74-86. DOI : 10.1016/j.baae.2021.02.015
- Girardin, M.P. ; Guo, X.J. ; Marchand, W. et Depardieu, C. (2024). Unravelling the biogeographic determinants of tree growth sensitivity to freeze and drought in Canada's forests. *Journal of Ecology*, 112(4), 848-869. DOI : 10.1111/1365-2745.14275
- Girardin, M.P. ; Hogg, E.H. ; Bernier, P.Y. ; Kurz, W.A. ; Guo, X.J. et Cyr, G. (2016). Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming. *Global Change Biology*, 22(2), 627-643. DOI : 10.1111/gcb.13072
- Goldblum, D. et Rigg, L.S. (2005). Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(11), 2709-2718. DOI : 10.1139/x05-185
- Gray, D.R. (2008). The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada. *Climatic Change*, 87, 361-383. DOI : 10.1007/s10584-007-9317-5
- Griesbauer, H. ; DeLong, S.C. ; Rogers, B. et Foord, V. (2021). Growth sensitivity to climate varies with soil moisture regime in spruce-fir forest in central British Columbia. *Trees*, 35, 649-669. DOI : 10.1007/s00468-020-02066-8
- Grossiord, C. ; Bachofen, C. ; Gisler, J. ; Mas, E. ; Vitasse, Y. et Didion-Gency, M. (2022). Warming may extend tree growing seasons and compensate for reduced carbon uptake during dry periods. *Journal of Ecology*, 110(7), 1575-1589. DOI : 10.1111/1365-2745.13892
- Grossiord, C. ; Buckley, T.N. ; Cernusak, L.A. ; Novick, K.A. ; Poulter, B. ; Siegwolf, R.T.W. ; Sperry, J.S. et McDowell, N.G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566. DOI : 10.1111/nph.16485
- Gutiérrez, E. ; Campelo, F. ; Camarero, J.J. ; Ribas, M. ; Muntán, E. ; Nabais, C. et Freitas, H. (2011). Climate controls act at different scales on the seasonal pattern of *Quercus ilex* L. stem radial increments in NE Spain. *Trees*, 25(4), 637-646. DOI : 10.1007/s00468-011-0540-3

- Hackett-Pain, A.J. ; Cavin, L. ; Friend, A.D. et Jump, A.S. (2016). Consistent limitation of growth by high temperature and low precipitation from range core to southern edge of European beech indicates widespread vulnerability to changing climate. *European Journal of Forest Research*, 135, 897-909. DOI : 10.1007/s10342-016-0982-7
- Haeni, M. ; Knüsel, S. ; Wilhelm, M. ; Peters, R.L. et Zweifel, R. (2020). *treenetproc – Clean, process and visualise dendrometer data. R package version 0.1.4*. <https://github.com/treenet/treenetproc/>
- Harvey, J.E. ; Smiljanić, M. ; Scharnweber, T. ; Buras, A. ; Cedro, A. ; Cruz-García, R. ; Drobyshev, I. ; Janecka, K. ; Jansons, Ā. ; Kaczka, R. ; Klisz, M. ; Läänelaid, A. ; Matisons, R. ; Muffler, L. ; Sohar, K. ; Spyt, B. ; Stolz, J. ; van der Maaten, E. ; van der Maaten-Theunissen, M. ; Vitas, A. ; Weigel, R. ; Kreyling, J. et Wilmking, M. (2019). Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Global Change Biology*, 26(4), 2505-2518. DOI : 10.1111/gcb.14966
- Herrmann, V. ; McMahon, S.M. ; Detto, M. ; Lutz, J.A. ; Davies, S.J. ; Chang-Yang, C.-H. et Anderson-Teixeira, K.J. (2016). Tree Circumference Dynamics in Four Forests Characterized Using Automated Dendrometer Bands. *PLOS One*, 11(2), e0169020. DOI : 10.1371/journal.pone.0169020
- Houle, D. ; Bouffard, A. ; Duchesne, L. ; Logan, T. et Harvey, R. (2012). Projections of Future Soil Temperature and Water Content for Three Southern Quebec Forested Sites. *Journal of Climate*, 25(21), 7690-7701. DOI : 10.1175/JCLI-D-11-00440.1
- Jing, T. ; Rongzhou, M. et Qing-Lai, D. (2021). Earlier and more variable spring phenology projected for eastern Canadian boreal and temperate forests with climate warming. *Trees, Forests and People*, 6, 100127. DOI : 10.1016/j.tfp.2021.100127
- Johnson, D.M. ; Wortemann, R. ; McCulloh, K.A. ; Jordan-Meille, L. ; Ward, E. ; Warren, J.M. ; Palmroth, S. et Domec, J.-C. (2016). A test of the hydraulic vulnerability segmentation hypothesis in angiosperm and conifer tree species. *Tree Physiology*, 36(8), 983-993. DOI : 10.1093/treephys/tpw031
- Johnston, M.H. ; Campagna, M. ; Gray, P.A. ; Kope, H.H. ; Loo, J.A. ; Ogden, A.E. ; O'Neill, G.A. ; Price, D.T. et Williamson, T.B. (2009). *Vulnerability of Canada's Tree Species to Climate Change and Management Options for Adaptation: An Overview for Policy Makers and Practitioners*. Canadian Council of Forest Ministers.
- Jourez, B. (2010). *Anatomie et identification des bois*. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.

- Kattge, J. ; Bönisch, G. ; Díaz, S. ; Lavorel, S. ; Prentice, I.C. ; Leadley, P. ; Tautenhahn, S. ; Werner, G.D.A. ; Aakala, T. ; Abedi, M. ; Acosta, A.T.R. ; Adamidis, G.C. ; Adamson, K. ; Aiba, M. ; Albert, C.H. ; Alcántara, J.M. ; Alcázar-Caicedo, C. ; Aleixo, I. ; Ali, H. ; Amiaud, B. ; Ammer, C. ; Amoroso, M.M. ; Anand, M. ; Anderson, C. ; Anten, N. ; Antos, J. ; Apgaua, D.M.G. ; Ashman, T.-L. ; Asmara, D.H. ; Asner, G.P. ; Aspinwall, M. ; Atkin, O. ; Aubin, I. ; Baastrup-Spohr, L. ; Bahalkeh, K. ; Bahn, M. ; Baker, T. ; Baker, W.J. ; Bakker, J.P. ; Baldocchi, D. ; Baltzer, J. ; Banerjee, A. ; Baranger, A. ; Barlow, J. ; Barneche, D.R. ; Baruch, Z. ; Bastianelli, D. ; Battles, J. ; Bauerle, W. ; Bauters, M. ; Bazzato, E. ; Beckmann, M. ; Beeckman, H. ; Beierkuhnlein, C. ; Bekker, R. ; Belfry, G. ; Belluau, M. ; Beloiu, M. ; Benavides, R. ; Benomar, L. ; Berdugo-Lattke, M.L. ; Berenguer, E. ; Bergamin, R. ; Bergmann, J. ; Bergmann Carlucci, M. ; Berner, L. ; Bernhardt-Römermann, M. ; Bigler, C. ; Bjorkman, A.D. ; Blackman, C. ; Blanco, C. ; Blonder, B. ; Blumenthal, D. ; Bocanegra-González, K.T. ; Boeckx, P. ; Bohlman, S. ; Böhning-Gaese, K. ; Boisvert-Marsh, L. ; Bond, W. ; Bond-Lamberty, B. ; Boom, A. ; Boonman, C.C.F. ; Bordin, K. ; Boughton, E.H. ; Boukili, V. ; Bowman, D.M.J.S. ; Bravo, S. ; Brendel, M.R. ; Broadley, M.R. ; Brown, K.A. ; Bruelheide, H. ; Brumnich, F. ; Bruun, H.H. ; Bruy, D. ; Buchanan, S.W. ; Bucher, S.F. ; Buchmann, N. ; Buitenwerf, R. ; Bunker, D.E. ; Bürger, J. ; Burrascano, S. ; Burslem, D.F.R.P. ; Butterfield, B.J. ; Byun, C. ; Marques, M. ; Scalon, M.C. et Caccianiga, M. (2020). TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. *Global Change Biology*, 26(1), 119-188. DOI : 10.1111/gcb.14904
- Keeland, B.D. et Sharitz, R.R. (1993). Accuracy of tree growth measurements using dendrometer bands. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(11), 2454-2457. DOI : 10.1139/x93-304
- Klesse, S. ; Babst, F. ; Evans, M.E.K. ; Hurley, A. ; Pappas, C. et Peters, R.L. (2022). Legacy effects in radial tree growth are rarely significant after accounting for biological memory. *Journal of Ecology*, 111(6), 1188-1202. DOI : 10.1111/1365-2745.14045.
- Knüsel, S. ; Peters, R.L. ; Haeni, M. ; Wilhelm, M. et Zweifel, R. (2021). Processing and extraction of seasonal tree physiological parameters from stem radius time series. *Forests*, 12(6), 765. DOI : 10.3390/f12060765
- Kwiaton, M. et Wang, J.R. (2015). Radial Growth Responses of Four Deciduous Species to Climate Variables in Central Ontario, Canada. *American Journal of Plant Sciences*, 6(14), 59372. DOI : 10.4236/ajps.2015.614226
- Larter, M. (2016). *Évolution de la résistance à la cavitation chez les conifères* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux]. HAL Thèses. <https://theses.hal.science/tel-01375936v1>
- Lebel-Desrosiers, S. (2021). *Facteurs écologiques régissant la régénération du chêne rouge (Quercus rubra L.) à la limite nordique de son aire de répartition au Québec* [Mémoire de maîtrise, Université de Montréal]. Papyrus. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/27052>
- Lesven, J.A. ; Druguet Dayras, M. ; Cazabonne, J. ; Gillet, F. ; Arsenault, A. ; Rius, D. ; Bergeron, Y. (2024). Future impacts of climate change on black spruce growth and mortality: review and challenges. *Environmental Reviews*, 32(2), 214-230. DOI : 10.1139/er-2023-0075
- Li, Q. ; Jiao, L. ; Xue, R. ; Chen, X. ; Zhang, P. ; Wang, X. ; et Yuan, X. (2023). Season and depth differences of soil moisture use for tree growth across wet and dry gradients in the Tibetan Plateau. *Forests*, 15(5), 752. DOI : 10.3390/f15050752

- Li, X. ; Piao, S. ; Wang, K. ; Wang, X. ; Wang, T. ; Ciais, P. ; Chen, A. ; Lian, X. ; Peng, S. et Peñuelas, J. (2020). Temporal trade-off between gymnosperm resistance and resilience increases forest sensitivity to extreme drought. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1075-1083. DOI : 10.1038/s41559-020-1217-3
- Liu, Y. et El-Kassaby, Y.A. (2018). Evapotranspiration and favorable growing degree-days are key to tree height growth and ecosystem functioning: Meta-analyses of Pacific Northwest historical data. *Scientific Reports*, 8, 8228. DOI : 10.1038/s41598-018-26681-1
- Logan, T. ; Charron, I. ; Chaumont, D. et Houle, D. (2011, mars). *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise* [Rapport]. Ouranos et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). <https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/1.-Atlas-climatique-for%C3%AAt.pdf>
- Mäkinen, H. ; Nöjd, P. ; Kahle, H.-P. ; Neumann, U. ; Tveite, B. ; Mielikäinen, K. ; Röhle, H. et Spiecker, H. (2002). Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 171(3), 243-259. DOI : 10.1016/S0378-1127(01)00786-1
- Marquis, B. (2016). *La limite de répartition supérieure de l'érable à sucre et du bouleau jaune sous contrôle climatique : étude dendroécologique le long d'un gradient d'élévation* [Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke]. Savoirs UdeS. <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/8735>
- Matula, R. ; Knířová, S. ; Vítámvás, J. ; Šrámek, M. ; Kníř, T. ; Ulbrichová, I. ; Svoboda, M. et Plichta, R. (2023). Shift in intra-annual growth dynamics drive a decline in productivity of temperate trees in Central European forest under warmer climate. *Science of the Total Environment*, 905, 166906. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2023.166906
- McDowell, N.G. ; Allen, C.D. ; Anderson-Teixeira, K. ; Aukema, B.H. ; Bond-Lamberty, B. ; Chini, L. ; Clark, J.S. ; Dietze, M. ; Grossiord, C. ; Hanbury-Brown, A. ; Hurtt, G.C. ; Jackson, R.B. ; Johnson, D.J. ; Kueppers, L. ; Lichstein, J.W. ; Ogle, K. ; Poulter, B. ; Pugh, T.A.M. ; Seidl, R. ; Turner, M.G. ; Uriarte, M. ; Walker, A.P. et Xu, C. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in changing world. *Science*, 368(6494), eaaz9463. DOI : 10.1126/science.aaz9463
- Meier, E. (2017). *White Spruce*. The Wood Database. <https://www.wood-database.com/white-spruce/>
- Meier, E. (2021a). *Red Maple*. The Wood Database. <https://www.wood-database.com/red-maple/>
- Meier, E. (2021b). *Distinguishing red and white oak*. The Wood Database. <https://www.wood-database.com/wood-articles/distinguishing-red-oak-from-white-oak/>
- Meier, E. (2022). *Balsam Fir*. The Wood Database. <https://www.wood-database.com/balsam-fir/>
- Messaoud, Y. ; Goudiaby, V. et Bergeron, Y. (2019). Persistence of balsam fir and black spruce populations in the mixedwood and coniferous bioclimatic domain of eastern North America. *Ecology and Evolution*, 9(9), 5118-5132. DOI : 10.1002/ece3.5069

- Miller, T.W. ; Strangler, D.F. ; Larysch, E. ; Honer, H. ; Seifert, T. et Kahle, H.-P. (2022). A methodological framework to optimize models predicting critical dates of xylem phenology based on dendrometer data. *Dendrochronologia*, 72, 125940. DOI : 10.1016/j.dendro.2022.125940
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF). (s. d.). *Système d'information géominière (SIGÉOM)* [Carte interactive]. Gouvernement du Québec.
https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/l1108_afchCarteIntr
- Ministère des Ressources naturelles, de la Faunes et des Parcs (MRNFP). (2003). *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Gouvernement du Québec.
<https://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs47344>
- Montgomery, R.A. ; Rice, K.E. ; Stefanski, A. et Reich, P.B. (2020). Phenological responses of temperate and boreal trees to warming depend on ambient spring temperatures, leaf habit, and geographic range. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(19), 10397-10405. DOI : 10.1073/pnas.1917508117
- Moreau, G. ; Achim, A. et Pothier, D. (2020). An accumulation of climatic stress events had led to years of reduced growth for sugar maple in southern Quebec, Canada. *Ecosphere*, 11(7), e03183. DOI : 10.1002/ecs2.3183
- Morneau, C. ; Couillard, P.-L. ; Laflamme, J. ; Major, M. ; Roy, V. et Veilleux, A. (2021). *Classification écologique du territoire québécois*. Direction des inventaires forestiers (DIF), Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP).
- Olivar, J. ; Bogino, S. ; Rathgeber, C. ; Bonnesoeur, V. et Bravo, F. (2014). Thinning has a positive effect on growth dynamics and growth-climate relationships in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Annals of Forest Science*, 71(3), 395-404. DOI : 10.1007/s13595-013-0348-y
- Onset Computer Corporation. (2018). *HOBOWare version 3.7.14*. Onset Computer Corporation, Bourne, MA, États-Unis. <https://www.onsetcomp.com/>
- Oogathoo, S. (s. d.). *Mesure du diamètre de l'arbre – Les dendromètres électroniques* [Rapport technique, document non publié].
- Oogathoo, S. ; Duchesne, L. ; Houle, D. ; Kneeshaw, D. et Bélanger, N. (2023). Seasonal, Monthly, and Diel growth, and Water Status Dynamics of Balsam Fir in a Cold and Humid Boreal Environment. *Forests*, 14(4), 802. DOI : 10.3390/f14040802
- Oogathoo, S. ; Duchesne, L. ; Houle, D. ; Kneeshaw, D. et Bélanger, N. (2024). Precipitation and relative humidity favours tree growth while air temperature and relative humidity respectively drive winter stem shrinkage and expansion. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1368590. DOI : 10.3389/ffgc.2024.1368590
- Oogathoo, S. ; Duchesne, L. ; Houle, D. et Kneeshaw, D. (2022). Characterizing Seasonal Radial Growth Dynamics of Balsam Fir in a Cold Environment Using Continuous Dendrometric Data: A Case Study in a 12-Year Soil Warming Experiment. *Sensors*, 22(14), 5155. DOI : 10.3390/s22145155

- Oogathoo, S. ; Houle, D. ; Duchesne, L. et Kneeshaw, D. (2020). Vapour pressure deficit and solar radiation are the major drivers of transpiration of balsam fir and black spruce tree species in humid boreal regions, even during a short-term drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108063. DOI : 10.1016/j.agrformet.2020.108063
- Pambou Nziengui, C.F. (2019). *Fissuration du bois en climat variable sous charge de longues durées : Applications aux essences européennes et gabonaises* [Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne]. HAL Thèses. <https://theses.hal.science/tel-02310783v2>
- Pappas, C. ; Bélanger, N. ; Bastien-Beaudet, G. ; Couture, C. ; D'Orangeville, L. ; Duchesne, L. ; Gennarretti, F. ; Houle, D. ; Hurley, A.G. ; Klesse, S. ; Lebel Desrosiers, S. ; Montoro Girona, M. ; Peters, R.L. ; Rossi, S. ; St-Amand, K. et Kneeshaw, D. (2022a). Xylem porosity, sapwood characteristics, and uncertainties in temperate and boreal forest water use. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323(6), 109092. DOI : 10.1016/j.agrformet.2022.109092
- Pappas, C. ; Bélanger, N. ; Bergeron, Y. ; Blarquez, O. ; Chen, H.Y.H. ; Comeau, P.G. ; De Grandpré, L. ; Delagrangé, S. ; DesRochers, A. ; Diochon, A. ; D'Orangeville, L. ; Drapeau, P. ; Duchesne, L. ; Filotas, E. ; Gennarretti, F. ; Houle, D. ; Lafleur, B. ; Langor, D. ; Lebel Desrosier, S. ; Lorenzetti, F. ; Man, R. ; Messier, C. ; Montoro Girona, M. ; Nock, C. ; Thomas, B.R. ; Work, T. et Kneeshaw, D. (2022b). **Smartforests** Canada: A Network of Monitoring Plots for Forest Management Under Environmental Change. Dans R. Tognetti, M. Smith et P. Panzacchi (dir.), *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions. Managing Forest Ecosystems, volume 40* (1^{ère} éd., p. 521-543). Springer. DOI : 10.1007/978-3-030-80767-2_16
- Patten, A.M. ; Vassão, D.N. ; Wolcott, M.P. ; Davin, L.B. et Lewis, N.G. (2010). Trees: A Remarkable Biochemical Bounty. Dans H.-W.(B.) Liu et L. Mander (dir.), *Comprehensive Natural Products II: Chemistry and Biology. Volume 3: Development & Modification of Bioactivity* (p.1173-1296). Elsevier Ltd.
- Pecl, G.T. ; Araújo, M.B. ; Bell, J.D. ; Blanchard, J. ; Bonebrake, T.C. ; Chen, I.-C. ; Clark, T.D. ; Colwell, R.K. ; Danielsen, F. ; Evengård, B. ; Falconi, L. ; Ferrier, S. ; Frusher, S. ; Garcia, R.A. ; Griffis, R.B. ; Hobday, A.J. ; Janion-Scheepers, C. ; Jarzyna, M.A. ; Jennings, S. ; Lenoir, J. ; Linnéved, H.I. ; Martin, V.Y. ; McCormack, P.C. ; McDonald, J. ; Mitchell, N.J. ; Mustonen, T. ; Pandolfi, J.M. ; Pettoelli, N. ; Popova, E. ; Robinson, S.A. ; Scheffers, B.R. ; Shaw, J.D. ; Sorte, C.J.B. ; Strugnell, J.M. ; Sunday, J.M. ; Tuanmu, M.-N. ; Vergés, A. ; Villanueva, C. ; Wernberg, T. ; Wapstra, E. et Williams, S.E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), eaai9214. DOI : 10.1126/science.aai9214
- Périé, C. ; de Blois, S. ; Lambert, M.-C. et Casajus, N. (2014). *Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec* (Mémoire de recherche forestière n° 173). Direction de la recherche forestière (DRF), Ministère des Ressources naturelles. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2331851>
- Périé, C. et de Blois, S. (2015). *Anticiper les effets des changements climatiques sur l'habitat des arbres dans la forêt sous aménagement au Québec : perspectives et approches* (Avis de recherche forestière n° 62). Direction de la recherche forestière (DRF), Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). https://mrnf-drf.shinyapps.io/devenir/_w_8bff2661/Avis62.pdf

- Périé, C. et de Blois, S. (2016). Dominant forest tree species are potentially vulnerable to climate change over large portions of their range even at high latitude. *PeerJ*, 4, e2218. DOI : 10.7717/peerj.2218
- Périé, C. et Lambert, M.-C. (2023). *Devenir des habitats sous l'influence des changements climatiques* [Carte interactive]. Direction de la recherche forestière (DRF), Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). <https://mrnf-drf.shinyapps.io/devenir/>
- Pierre, F. (2011). *Traitement thermique du bois en vue de sa valorisation énergétique : effet de l'intensité de traitement sur la composition chimique, les propriétés énergétiques et la résilience mécanique* [Thèse de doctorat, AgroParisTech]. HAL Thèses. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01066141>
- Prentice, I.C. ; Cramer, W. ; Harrison, S. ; Leemans, R. ; Monserud, R. et Solomon, A. (1992). A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19(2), 117-134. DOI : 10.2307/2845499
- Ramos-Fernández, J.C. ; Balmat, J.-F. ; Márquez-Vera, M.A. ; Lafont, F. ; Pessel, N. ; Espinoza-Quesada, E.S. (2016). Fuzzy Modeling Vapor Pressure Deficit to Monitoring Microclimate in Greenhouses. *IFAC-PapersOnLine*, 46(16), 371-374. DOI : 10.1016/j.ifacol.2016.10.068
- Rasheed, F. et Delagrange, S. (2016). Acclimatation of *Betula alleghaniensis* Britton to moderate soil water deficit: small morphological changes make for important consequences in crown display. *Tree Physiology*, 36(11), 1320-1329. DOI : 10.1093/treephys/tpw064
- Régnière, J. ; Saint-Amant, R. ; Béchar, A. et Moutaoufik, A. (2017). *BioSim 11 – User's Manual: Update of Information Report LAU-X-137*. Centre de foresterie des Laurentides, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada (RNCan).
- Ressources naturelles Canada (RNCan). (2022a). ***Abies balsamea*** : p 1971-2000 [Carte interactive]. Gouvernement du Canada. <http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000005&phz=p10000051971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCan). (2022b). ***Acer rubrum*** : p 1971-2000 [Carte interactive]. Gouvernement du Canada. <http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000050&phz=p10000501971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCan). (2022c). ***Acer saccharum*** : p 1971-2000 [Carte interactive]. Gouvernement du Canada. <http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000053&phz=p10000531971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCan). (2022d). ***Betula alleghaniensis*** : p 1971-2000 [Carte interactive]. Gouvernement du Canada. <http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1004133&phz=p10041331971-2000>

- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022e). ***Betula papyrifera*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000176&phz=p10001761971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022f). ***Fagus grandifolia*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000468&phz=p10004681971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022g). ***Fraxinus nigra*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000491&phz=p10004911971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022h). ***Picea glauca*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000794&phz=p10007941971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022i). ***Populus tremuloides*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000871&phz=p10008711971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022j). ***Quercus rubra*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1000963&phz=p10009631971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022k). ***Thuja occidentalis*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?lang=en&m=24b&s=biomap&speciesid=1001217&phz=p10012171971-2000>
- Ressources naturelles Canada (RNCa). (2022l). ***Fraxinus americana*** : p 1971-2000 [Carte interactive].
Gouvernement du Canada.
<http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?m=24b&s=biomap&speciesid=1000486&phz=p10004861971-2000&&lang=en>
- Roignant, J. (2018). *Biologie de développement du bois en réponse à des sollicitations mécaniques environnementales* [Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne]. HAL Thèses.
<https://theses.hal.science/tel-02004248/>
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC, Boston, MA, États-Unis. <https://www.rstudio.com/>
- Rumyantseva, A.Z. ; Chekrygin, S.A. et Vidyagina, E.O. (2023). Interrelation of the Radial Increment of Trees with Various Factors. *Physiologia*, 3(2), 347-365. DOI : 10.3390/physiologia3020024

- Safford, L.O. ; Bjorkbom, J.C. et Zasada, J.C. (1990). *Betula papyrifera* Marsh. Paper Birch. Dans R.M. Burns et B.H. Honkala (dir.), *Silvics of North America. Volume 2: Hardwoods* (p. 341-359). United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Agriculture Handbook 654.
- Salomón, R.L. ; Peters, R.L. ; Zweifel, R. ; Sass-Klaassen, U.G.W. ; Stegehuis, A.I. ; Smiljanic, M. ; Poyatos, R. ; Babst, F. ; Cienciala, E. ; Fonti, P. ; Lerink, B.J.W. ; Lindner, M. ; Martinez-Vilalta, J. ; Mencuccini, M. ; Nabuurs, G.-J. ; van der Maaten, E. ; von Arx, G. ; Bär, A. ; Akhmetzyanov, L. ; Balanzategui, D. ; Bellan, M. ; Bendix, J. ; Berveiller, D. ; Blažene, M. ; Čada, V. ; Carraro, V. ; Cecchini, S. ; Chan, T. ; Conedera, M. ; Delpierre, N. ; Delzon, S. ; Ditmarová, L. ; Dolezal, J. ; Dufrêne, E. ; Edvardsson, J. ; Ehekircher, S. ; Forner, A. ; Frouz, J. ; Ganthaler, A. ; Gryc, V. ; Güney, A. ; Heinrich, I. ; Hentschel, R. ; Janda, P. ; Ježík, V. ; Kahle, H.-P. ; Knüsel, S. ; Krejza, J. ; Kuberski, Ł. ; Kučera, J. ; Lebourgeois, F. ; Mikolás, M. ; Matula, R. ; Mayr, S. ; Oberhuber, W. ; Obojes, N. ; Osborne, B. ; Paljakka, T. ; Plichta, R. ; Rabbel, I. ; Rathgeber, C.B.K. ; Salmon, Y. ; Saunders, M. ; Scharnweber, T. ; Sitková, Z. ; Stangler, D.F. ; Stereńczak, K. ; Stojanović, M. ; Střelcová, K. ; Světlík, J. ; Svoboda, M. ; Tobin, B. ; Trotsiuk, V. ; Urban, J. ; Valladares, F. ; Vavřík, H. ; Vejpustková, M. ; Walthert, L. ; Wilming, M. ; Zin, E. ; Zou, J. et Steppe, K. (2022). The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nature Communications*, 13(1), 28. DOI : 10.1038/s41467-021-27579-9
- Savage, C. (2001). *Recolonisation forestière dans les Basses Laurentides au sud du domaine climatique de l'érablière à bouleau jaune* [Mémoire de maîtrise, Université de Montréal].
https://sbl.umontreal.ca/public/FAS/sbl/Documents/4-Territoire/Biodiversite/memoire_Caroline_Savage.pdf
- Savage, J.A. ; Kiecker, T. ; McMann, N. ; Park, D. ; Rothendler, M. et Mosher, K. (2022). Leaf out time correlates with wood anatomy across large geographic scales and within local communities. *New Phytologist*, 235(3), 953-964. DOI : 10.1111/nph.18041
- Savage, V.M. ; Bentley, L.P. ; Enquist, B.J. ; Sperry, J.S. ; Smith, D.D. ; Reich, P.B. et von Allmen, E.I. (2010). Hydraulic trade-offs and space filling enable better predictions of vascular structure and function in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52), 22722-22727. DOI : 10.1073/pnas.1012194108
- Schuldt, B. ; Buras, A. ; Arend, M. ; Vitasse, Y. ; Beierkuhnlein, C. ; Damm, A. ; Gharun, M. ; Grams, T.E.E. ; Hauck, M. ; Hajek, P. ; Hartmann, H. ; Hiltbrunner, E. ; Hoch, G. ; Holloways-Philips, M. ; Körner, C. ; Larysch, E. ; Lübbe, T. ; Nelson, D.B. ; Rammig, A. ; Rigling, A. ; Rose, L. ; Ruehr, N.K. ; Schumann, K. ; Weiser, F. ; Werner, C. ; Wohlgemuth, T. ; Zang, C.S. et Kahmen, A. (2020). A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45, 86-103. DOI : 10.1016/j.baae.2020.04.003
- Sellin, A. ; Alber, M. ; Keinänen, M. ; Kupper, P. ; Lihavainen, J. ; Löhmus, K. ; Oksanen, E. ; Söber, J. et Tullus, A. (2017). Growth of northern deciduous trees under increasing atmospheric humidity: possible mechanisms behind the growth retardation. *Regional Environmental Change*, 17(7), 2135-2148. DOI : 10.1007/s10113-016-1042-z

- Shaw, C.H. ; Lundkvist, H. ; Moldenke, A. et Boyle, J.R. (1991). The relationships of soil fauna to long-term forest productivity in temperate and boreal ecosystems: processes and research strategies. Dans W.J. Dyck et C.A. Mees (dir.), *Long-term Field Trials to Assess Environmental Impacts of Harvesting* (p. 39-77). New Zealand Forest Service, Forest Research Institute, FRI Bulletin No. 161.
- Silva, L.C.R. et Lambers, H. (2020). Soil-plant-atmosphere interactions: structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation. *Plant and Soil*, 461(46), 5-27. DOI : 10.1007/s11104-020-04427-1
- Solarik, K.A. ; Messier, C. ; Ouimet, R. ; Bergeron, Y. et Gravel, D. (2018). Local adaptation of trees at the range margins impacts range shifts in the face of climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 27(12), 1507-1519. DOI : 10.1111/geb.12829
- Song, Y. ; Sass-Klaassen, U. ; Sterck, F. ; Goudzwaard, L. ; Akhmetzyanov, L. et Poorter, L. (2021). Growth of 19 conifer species is highly sensitive to winter warming, spring frost and summer drought. *Annals of Botany*, 128(5), 545-557. DOI : 10.1093/aob/mcab090
- Soubeyrand, M. ; Marchand, P. ; Duchesne, L. ; Bergeron, Y. et Gennaretti, F. (2024). Interactions between climate, soil and competition drive tree in Quebec forests. *Forest Ecology and Management*, 555, 121731. DOI : 10.1016/j.foreco.2024.121731
- Spectrum Technologies, Inc. (s. d.). *Watermark Soil Moisture Sensor. Product Manual. Item # 6450WD*. Spectrum Technologies, Inc., Aurora, Illinois, États-Unis.
- Sperry, J.S. ; Hacke, U.G. et Pittermann, J. (2006). Size and Function in Conifer Tracheids and Angiosperm Vessels. *American Journal of Botany*, 93(10), 1490-1500.
https://www.jstor.org/stable/4123132?seq=1#metadata_info_tab_contents
- St. George, S. et Ault, T.R. (2014). The imprint of climate within Northern Hemisphere trees. *Quaternary Science Reviews*, 89, 1-4. DOI : 10.1016/j.quascirev.2014.01.007
- Steppe, K. et Lemeur, R. (2007). Effects of ring-porous and diffuse-porous stem wood anatomy on the hydraulic parameters used in water flow and storage model. *Tree Physiology*, 27(1), 43-52. DOI : 10.1093/treephys/27.1.43
- Systat Software, Inc. (2010). *SigmaPlot version 12.0*. Systat Software, Inc., San Jose, Californie, États-Unis.
<https://www.systatsoftware.com/>
- Tei, S. ; Kotani, A. ; Sugimoto, A. et Shin, N. (2021). Geographical, Climatological, and Biological Characteristics of Tree Radial Growth Response to Autumn Climate Change. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 687749. DOI : 10.3389/ffgc.2021.687749
- Thiel, D. ; Kreyling, J. ; Backhaus, S. ; Beierkuhnlein, C. ; Buhk, C. ; Egen, K. ; Huber, G. ; Konnert, M. ; Nagy, L. et Jentsch, A. (2014). Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. *European Journal of Forest Research*, 133, 247-260. DOI : 10.1007/s10342-013-0750-x

- Tian, Q. ; He, Z. ; Xiao, S. ; Peng, X. ; Lin, P. ; Zhu, X. et Feng, X. (2024). Intra-annual stem radial growth of Qinghai spruce and its environmental drivers in the Qilian Mountains, northwestern China. *Science of the Total Environment*, 915, 170093. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2024.170093
- Toledo, M. ; Poorter, L. ; Peña-Claros, M. ; Alarcón, A. ; Balcázar, J. ; Leño, C. ; Licona, J.C. ; Llanque, O. ; Vroomans, V. ; Zuidema, P. et Bongers, F. (2010). Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology*, 99(1), 254-264. DOI : 10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x
- Trahan, M.W. et Schubert, B.A. (2016). Temperature-induced water stress in high-latitude forests in response to natural and anthropogenic warming. *Global Change Biology*, 22(2), 782-791. DOI : 10.1111/gcb.13121
- Tubbs, C.H. et Houston, D.R. (1990). *Fagus grandifolia* Ehrh. American Beech. Dans R.M. Burns et B.H. Honkala (dir.), *Silvics of North America. Volume 2: Hardwoods* (p. 653-667). United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Agriculture Handbook 654.
- Urli, M. ; Périé, C. ; Thiffault, N. ; Coyea, M.R. ; Pepin, S. ; Logan, T. et Munson, A.D. (2023). Experimental drier climates affect hydraulics and induce high mortality of seedlings of three northern conifer species. *Forest Ecology and Management*, 544, 121127. DOI : 10.1016/j.foreco.2023.121127
- Urli, M. ; Porté, A.J. ; Cochard, H. ; Guengant, Y. ; Burlett, R. et Delzon, S. (2013). Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiology*, 33(7), 672-683. DOI : 10.1093/treephys/tpt030
- Urrutia-Jalabert, R. ; Rossi, S. ; Deslauriers, A. ; Malhi, Y. et Lara, A. (2015). Environmental correlates of stem radius change in the endangered *Fitzroya cupresoides* forest of southern Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 209-221. DOI : 10.1016/j.agrformet.2014.10.001
- van Bellen, S. ; Garneau, M. et Bergeron, Y. (2010). Impacts of Climate Change on Forest Fire Severity and Consequences for Carbon Stocks in Boreal Forest Stands of Quebec, Canada: a Synthesis. *Fire Ecology*, 6, 16-44. DOI : 10.4996/fireecology.0603016
- Vaughn, W.R. ; Taylor, A.R. ; MacLean, D.A. ; D'Orangeville, L. et Lavigne, M.B. (2021). Climate change experiment suggests divergent responses of tree seedlings in eastern North America's Acadian Forest Region over the 21st century. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(12), 1888-1902. DOI : 10.1139/cjfr-2021-0047
- Vellend, M. ; Béhé, M. ; Carteron, A. ; Crofts, A.L. ; Danneyrolles, V. ; Gamhewa, H.T. ; Ni, M. ; Rinas, C.L. et Watts, D.A. (2021). Plant Responses to Climate Change and an Elevational Gradient in Mont Mégantic National Park, Québec, Canada. *Northeastern Naturalist*, 28(11), 4-28. <https://www.eaglehill.us/NENAonline/articles/NENA-sp-11/11-Vellend.shtml>
- Venturas, M.D. ; Sperry, J.S. et Hacke, U.G. (2017). Plant xylem hydraulics: What we understand, current research, and future challenges. *Journal of Integrative Plant Biology*, 59(6), 356-389. DOI : 10.1111/jipb.12534

- Vilhar, U. ; Beuker, E. ; Mizunuma, T. ; Skudnik, M. ; Lebourgeois, F. ; Soudani, K. et Wilkinson, M. (2013). Chapter 9 – Tree Phenology. *Developments in Environmental Science*, 12, 169-182. DOI : 10.1016/B978-0-08-098222-9.00009-1
- Villiard, A. (2019). *Effets de la compétition et de la saisonnalité des sécheresses sur la croissance relative des sapins baumiers* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/13881/>
- Wang, J. et Sammis, T.W. (2008). New automatic band and point dendrometers for measuring stem diameter growth. *Applied Engineering in Agriculture*, 24(6), 731-742. DOI : 10.13031/2013.25361
- Wang, J.R. (1997). *Competition between paper birch and Douglas-fir in two different biogeoclimatic zones of British Columbia* [Thèse de doctorat, University of British Columbia].
- Way, D.A. et Oren, R. (2010). Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology*, 30(6), 669-688. DOI : 10.1093/treephys/tpq015
- Weston, C.J. et Whittaker, K.L. (2004). SOIL BIOLOGY AND TREE GROWTH | Soil Biology. Dans J. Burley (dir.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (1^{ère} éd., p. 1183-1189). Elsevier Ltd. DOI : 10.1016/B0-12-145160-7/00248-9
- Wickham, H. ; François, R. ; Henry, L. et Müller, K. (2019). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.8.3*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr/>
- Wiedenhoef, A.C. (2013). Structure and Function of Wood. Dans R.M. Rowell (dir.), *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (2^e éd., p. 9-32). Taylor & Francis Group, LLC.
- Williamson, T. ; Colombo, S. ; Duinker, P. ; Gray, P. ; Hennessey, R. ; Houle, D. ; Johnson, M. ; Ogden, A. et Spittlehouse, D. (2009). *Climate change and Canada's forests: from impacts to adaptation*. Réseau de gestion durable des forêts et Centre de foresterie du Nord, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada (RNCAN).
- Wu, Z. ; Dijkstra, P. ; Koch, G.W. ; Peñuelas, J. et Hungate, B.A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17(2), 927-942. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2010.02302.x
- Zach, A. ; Schuldt, B. ; Brix, S. ; Horna, V. ; Culmsee, H. et Leuschner, C. (2010). Vessel diameter and xylem hydraulic conductivity increase with tree height in tropical rainforest trees in Sulawesi, Indonesia. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205(8), 506-512. DOI : 10.1016/j.flora.2009.12.008
- Zarnovican, R. (2000). Climate and volume growth of young yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britton) at three sites in the sugar maple-yellow birch forest region of Québec. *Écoscience*, 7(2), 222-227. DOI : 10.1080/11956860.2000.11682591
- Zhang, J. ; Huang, S. et He, F. (2015a). Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(13), 4009-4014. DOI : 10.1073/pnas.1420844112

- Zhang, L. ; Chen, Y. ; Hao, G. ; Ma, K. ; Bongers, F. et Sterck, F.J. (2020). Conifer and broadleaved trees differ in branch allometry but maintain similar functional balances. *Tree Physiology*, 40, 511-519. DOI : 10.1093/treephys/tpz139
- Zhang, X. ; Flato, G. ; Kirchmeier-Young, M. ; Vincent, L. ; Wan, H. ; Wang, X. ; Rong, R. ; Fyfe, J. ; Li, G. et Kharin V.V. (2019). Chapitre 4 : Les changements de température et de précipitations au Canada. Dans E. Bush et D.S. Lemmen (dir.), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (p. 113-193). Gouvernement du Canada.
- Zhang, Y. (2014). *Tree growth and forest dynamics at transitional zones between temperate and boreal forests of northeastern China and eastern Canada* [Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue]. Depositum. <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/615/>
- Zhang, Y. ; Bergeron, Y. ; Zhao, X.-H. et Drobyshev, I. (2015b). 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), 368-379. DOI : 10.1093/jpe/rtu029
- Zhang, Y. ; Hong, S. ; Liu, Q. ; Huntingford, C. ; Peñuelas, J. ; Rossi, S. ; Myneni, R.B. et Piao, S. (2023). Autumn canopy senescence has slowed down with global warming since the 1980s in the Northern Hemisphere. *Communications Earth & Environment*, 4, 173. DOI : 10.1038/s43247-023-00835-0
- Zhao, Y. ; Tian, H. ; Han, Q. ; Gu, J. et Zhao, Y. (2021). Real-time monitoring of water and ice content in plant stem based on latent heat changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108475. DOI : 10.1016/j.agrformet.2021.108475
- Zhou, L. ; Saeed, S. ; Sun, Y. ; Zhang, B. ; Luo, M. ; Li, Z. et Amir, M. (2019). The relationship between water storage and biomass components in two conifer species. *PeerJ*, 7, e7901. DOI : 10.7717/peerj.7901
- Ziaco, E. ; Truettner, C. ; Biondi, F. et Bullock, S. (2018). Moisture-driven xylogenesis in *Pinus ponderosa* from a Mojave Desert mountain reveals high phenological plasticity. *Plant, Cell & Environment*, 41(4), 823-836. DOI : 10.1111/pce.13152
- Zimmermann, J. ; Link, R.M. ; Hauck, M. ; Leuschner, C. et Schuldt, B. (2021). 60-year record of stem xylem anatomy and related hydraulic modification under increased summer drought in ring- and diffuse-porous temperate broad-leaved tree species. *Trees*, 35, 919-937. DOI : 10.1007/s00468-021-02090-2
- Zlobin, I.E. (2022). Linking the growth patterns of coniferous species with their performance under climate aridization. *Science of the Total Environment*, 831, 154971. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2022.154971