

5^{ème} année

Rapport de stage individuel

**Comparaison de la croissance du peuplier
faux-tremble et de l'épinette noire, deux
espèces boréales aux stratégies
écologiques différentes.**

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
Station de recherche de la FERLD, 488 ch. du Balbuzard
J0Z 3G0 Rapide-Danseur



Tuteur entreprise :
Valentina Buttò
Professeure chercheuse

Tuteur académique :
Séraphine Grellier

Béatrice Gouraud
IMATGE- ADAGE
2024-2025

Sommaire

Remerciements	4
Introduction.....	5
I. Contexte de l'étude.....	6
A. Contexte spatial.....	6
1. Forêt boréale québécoise et domaines bioclimatiques.....	6
2. La sapinière à bouleau à papier	6
3. La forêt boréale mixte de la FERLD	6
B. Croissance des espèces boréales	7
1. Stratégies écologiques et succession écologique	7
2. Cycle phénologique.....	8
3. Stratégies et traits fonctionnels du bois	8
a. Anatomie du bois.....	8
b. La formation du bois : xylogenèse	9
C. Choix et caractéristiques des espèces étudiées	11
II. Matériels et Méthodes.....	11
A. Phase terrain	11
1. Pré-requis pour la phase de terrain	11
a. Formations.....	11
b. Choix des placettes.....	11
2. Mise en place et déroulé du protocole terrain.....	13
a. Sélection et caractéristiques des individus étudiés.....	13
b. Calendrier et protocole d'échantillonnage.....	14
B. Phase laboratoire	15
1. Elaboration du protocole et tests préalables	16
2. Protocole suivi.....	16
a. Etape 1 : Préparation des échantillons.....	16
b. Etape 2 : Déshydratation et infiltration	17
c. Etape 3 : Enrobage des microcarottes.....	17
d. Etape 4 : Dégrossissage/Rabotage	18
e. Etape 5 : Coupe et préparation des échantillons	19
f. Etape 6 : Coloration	20
g. Etape 7 : Photographie et prise de mesures	21
III. Résultats	23
A. Caractérisation des individus étudiés par site et par espèce.....	23
B. Croissance II des individus étudiés par site et par espèce	24
C. Croissance I des individus peuplier étudiés par site et par espèce	27

IV. Discussion.....	29
A. L'effet des sites sur la croissance	29
B. La temporalité de l'étude induit un biais	29
C. Les conditions phénologiques varient entre les années	30
D. Les améliorations possibles.....	30
Conclusion	31
Crédits	31
Bibliographie	32
Annexes	40

Table des figures

Figure 1 : Site d'études A, B et C	12
Figure 2 : Localisation des différents sites d'étude dans le périmètre de la FERLD, au Québec, Canada	13
Figure 3 : Utilisation des outils pour la caractérisation des arbres étudiés (a): tarière de Pressler, (b) : Mètre de circonférence, (c) : hypsomètre	14
Figure 4 : Etapes de prélèvement des microcarottes de bois, (1) : enfoncer le trephor dans le tronc à l'aide du maillet, (2) : retirer le trephor, (3) : faire coulisser la microcarotte dans la chambre d'extraction à l'aide de l'extracteur, (4) : mettre la microcarotte dans un tube eppendorf	15
Figure 5 : Préparation et orientation des microcarottes, (1) : couper les parties non analysées de la microcarotte, (2) : marquer la microcarotte, (3) : mettre la microcarotte dans la cassette, (4) : fermer la microcassette	17
Figure 6 : Montage expérimental pour l'infiltration des microcarottes, (A) : bain d'éthanol, (B) : bain de paraffine	17
Figure 7 : Etapes de l'enrobage (1) : retirer les microcassettes du bain de paraffine, (2) : mettre les microcassettes dans l'enrobeuse, (3) : ouvrir les microcassettes, (4) : couler une première couche de paraffine, (5) : placer la microcarotte dans le moule, (6) refroidir sur la cryosole, (7) : couler de la paraffine à travers la cassette, (8) : refroidir pendant environ 20 minutes sur la cryosole.....	18
Figure 8 : Etapes du dégrossissage, (1) : cassette démoulée, (2) : racler les coulures, (3) : dégrossissage au microtome, (4) : trempage des blocs dans l'eau avec une goutte de glycérol.....	19
Figure 9 : Etapes de la coupe des blocs de paraffine, (1) : coupe à 7-8 μm , (2) : récupération du ruban paraffine, (3) : dépôt du ruban de paraffine dans le bain thermostaté, (4) : ruban de paraffine flottant et s'étirant, (5) : récupération du ruban sur une lame, (6) nettoyage des bords de la lame.....	20
Figure 10 : Coloration et collage des lames, (A) : Configuration du matériel utilisé pour la coloration, (B) : exemple : étape du rinçage à l'éthanol, (C) étapes du collage	21
Figure 11 : Prise de photo des lames	22
Figure 12 : Exemple de mesures sous le logiciel Wincell	22
Figure 13 : Boxplots de la hauteur, du diamètre et de l'âge des individus par site et par espèce	23
Figure 14 : Répartition des zones de développement par site et par espèce.....	24
Figure 15 : Zones de développement au fil du temps (DOY) par site et par espèce.....	25
Figure 16 : Croissance totale moyenne par site et par espèce	25
Figure 17 : Taux de croissance moyen par espèce et par site.....	26
Figure 18 : Croissance totale en fonction du jour de l'année (DOY) pour chaque site et chaque espèce	27
Figure 19 : Evolution du nombre de peupliers ayant développés totalement leurs feuilles (stade 5). 27	

Figure 20 : Evolution des stades phénologiques des peupliers par site, 1 : bourgeons gonflés, 2 : vert des bourgeons visibles mais formant toujours une seule pointe, 3 : débourrement : les extrémités des feuilles commencent à se séparer, 4 : expansion des feuilles, 5 : feuilles développées 28

Table des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des peuplements choisis pour l'étude.....	12
Tableau 2 : Calendrier d'échantillonnage et conditions météorologiques	14
Tableau 3 : Comparaison des différents protocoles d'infiltration de paraffine	16

Table des annexes

Annexe 1 : Carte des domaines bioclimatiques du Québec.....	40
Annexe 2 : Liste du matériel utilisé	41
Annexe 3 : Recette pour préparer l'eau albuminée	42
Annexe 4 : Recette pour préparer le colorant safranine alcian blue	42
Annexe 5 : Q-Q plot et résidus standards	43

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier ma tutrice de stage Valentina Buttò pour son accompagnement et les conseils qu'elle m'a prodigués durant mon stage.

Je tiens à remercier tout particulièrement Hailey Krackovitch-Pellat pour le travail réalisé ensemble durant ce projet. Merci à Lucie Barbier pour son aide dans l'élaboration du protocole de laboratoire.

J'ai également une pensée pour tous les habitants et chercheurs.euses de la FERLD qui m'ont permis de travailler dans un cadre convivial et riche de découvertes.

Enfin, je souhaite remercier mes proches qui m'ont soutenu et offert des relectures et des corrections.

Introduction

Dans le cadre de mes études d'ingénieur·e en Aménagement et Environnement, option Aménagement DurAble et Génie Écologique (ADAGE) à Polytech Tours, un stage de fin d'études de 20 semaines minimum est nécessaire pour obtenir le diplôme. Souhaitant élargir mon expérience à l'international et développer de nouvelles compétences, j'ai cherché un stage à l'étranger. J'ai ainsi eu l'opportunité de réaliser un stage de recherche en foresterie au Québec.

Ainsi, j'ai été accueillie comme stagiaire au sein de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), notamment reconnue pour ses recherches en environnement et avenir durable ; créativité et nouvelles technologies ; savoirs autochtones ; collectivités et intelligences régionales ; santé globale, via un vaste réseau de chaires¹ de recherche et deux instituts de recherche (UQAT, 2025). J'ai été plus précisément affecté à l'institut de recherche sur les forêts (IRF) afin de contribuer aux missions pour améliorer la connaissance sur la forêt boréale, maintenir les services rendus par les écosystèmes forestiers et favoriser la gestion intégrée du territoire forestier (UQAT, s. d.).

J'ai eu l'opportunité de travailler à la station de recherche de la Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (FERLD) durant toute la durée de mon stage. La recherche en écologie forestière y a débuté à la fin des années 1970 (FERLD, s. d.). La FERLD, située au sein de la forêt boréale, est un laboratoire géant (8 405 ha) à ciel ouvert qui permet d'expérimenter. L'objectif est de développer des modes de gestion et d'aménagement forestiers qui respectent le fonctionnement de l'écosystème et tiennent compte des attentes du milieu socio-économique. Cela permet également de mieux connaître les espèces vivantes dans cet écosystème et la façon dont évolue la forêt après les feux (FERLD, s. d.). La FERLD est ainsi gérée par les universités de l'UQAM et l'UQAT en collaboration avec deux compagnies forestières.

La station de la FERLD est donc un endroit privilégié de formation et de rencontre avec de nombreux chercheurs·euses. J'ai donc suivi mon stage dans un cadre agréable, dynamique et stimulant pour apprendre et développer de nouvelles compétences.

Mon stage s'inscrit dans le cadre du programme de recherche de mon encadrante Valentina Buttó sur la croissance intra-annuelle et la dynamique de séquestration du carbone d'espèces d'arbres en forêt boréale et leurs réponses aux changements environnementaux. J'ai ainsi travaillé sur la croissance annuelle de deux espèces boréales présentes au sein d'un même peuplement et confrontées aux mêmes conditions environnementales.

Ce rapport de stage présentera le travail de recherche réalisé durant mon stage, à savoir : la bibliographie lue pour présenter le contexte de l'étude, la collecte des échantillons sur le terrain, la phase de traitement des échantillons en laboratoire, puis les mesures réalisées et l'analyse des données.

¹ Une chaire est une entité de recherche soutenue par un financement de sources gouvernementales ou autre appuyant la rémunération des titulaires et/ou le déroulement d'activités de recherche et ayant comme objectif principal la formation par la recherche d'une relève scientifique de haut niveau en milieu universitaire (Université de Sherbrooke).

I. Contexte de l'étude

A. Contexte spatial

1. Forêt boréale québécoise et domaines bioclimatiques

Dans la zone boréale, la végétation est majoritairement constituée de forêts boréales avec prédominance d'espèces de conifères et quelques espèces de feuillus. Cette zone est située dans la partie nordique de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique (Ressources naturelles Canada, 2020). Ce biome comporte peu d'espèces d'arbres à l'échelle du continent, avec essentiellement des espèces généralistes et vigoureuses qui supportent différentes perturbations naturelles récurrentes, inhérentes à la forêt boréale comme les feux et les épidémies d'insectes (ex : livrée des forêts, tordeuse du bourgeon de l'épinette...) (Poulin, 2008).

La zone boréale s'étend sur 70% de la superficie du Québec, ce qui fait d'elle la zone de végétation québécoise la plus vaste (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2022). On distingue trois sous-zones du sud au nord, la forêt fermée (ou forêt continue), la forêt ouverte et la toundra forestière, qui comprennent différents domaines bioclimatiques² (Grondin et al., 2023) (voir carte en Annexe 1).

Le terrain de notre étude fait partie de la forêt continue, où les peuplements sont relativement denses et sont utilisés pour l'exploitation commerciale.

Au Canada, la grande majorité (94%) des forêts boréales sont des territoires publics (Ressources naturelles Canada, 2024). Ainsi, depuis de nombreuses années, le gouvernement réglemente, à l'échelle provinciale, territoriale et fédérale, l'industrie forestière et planifie un aménagement durable en améliorant les méthodes de gestion notamment par le biais de la recherche scientifique. C'est dans ce cadre, au sein de la FERLD, que j'ai accompli ma mission de recherche.

La forêt continue se divise en deux domaines bioclimatiques : la pessière à mousse et la sapinière à bouleau blanc (ou bouleau à papier) où se situe notre étude.

2. La sapinière à bouleau à papier

La sapinière à bouleau à papier représente 9% du Québec, c'est le domaine bioclimatique le plus méridional de la zone boréale (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2022). Il est situé à la limite avec le nord de la forêt tempérée. Comme son nom l'indique, les forêts de sapins sont fortement présentes dans le domaine, avec en majorité des forêts de sapins baumier (*Abies balsamea*), de bouleaux à papier (*Betula papyrifera*) et d'épinettes blanches (*Picea glauca*). On peut aussi retrouver des forêts de pins gris (*Pinus banksiana*) issues de feux, mais également des jeunes forêts de bouleaux à papiers et de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) issues de coupes ou de feux. Enfin, les forêts d'épinettes noires (*Picea mariana*) associées au sapin baumier sont couramment répandues dans le domaine (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2022). Ainsi, bien que la forêt boréale soit relativement uniforme à l'échelle continentale, elle présente, à une échelle plus locale, une vaste diversité de types forestiers en fonction de différents facteurs écologiques.

3. La forêt boréale mixte de la FERLD

² « Les domaines bioclimatiques sont de grands territoires définis d'après la végétation de fin de succession sur les sites mésiques, c'est-à-dire des sites où les conditions de croissance sont moyennes, donc ni trop humides, ni trop sèches » (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2022).

Au sein de la FERLD, une partie du territoire est une zone d'aménagement (75%) et l'autre une zone de conservation (25%) (FERLD, s. d.). La zone d'aménagement sert à développer et à appliquer différentes méthodes de gestion écosystémiques avec des coupes totales et partielles qui sont suivies de régénération naturelle ou de plantations. La zone de conservation est constituée de forêts issues de plusieurs feux ayant eu lieu entre 1760 et 1944 (FERLD, s. d.). La forêt conservée évolue ainsi naturellement et sert de témoin de la régénération naturelle et peut-être comparée aux zones aménagées. La FERLD comporte donc une série de peuplements différents représentatifs de méthodes de gestion et de succession naturelle.

B. Croissance des espèces boréales

1. Stratégies écologiques et succession écologique

Plusieurs théories sur les stratégies des plantes ont été développées, l'une des plus connues est le triangle de Grime : les stratégies des plantes sont classées en fonction de leurs réponses aux perturbations et au stress de leur milieu de vie. On distingue trois stratégies extrêmes : compétitive (C) (peu de perturbation, peu de stress), tolérante au stress (S) (fort stress, perturbation faible), rudérale (R) (forte perturbation, peu de stress) (Grime, 1977).

Les stratégies écologiques peuvent être étudiées par le biais de la succession écologique, en distinguant l'évolution temporelle de la composition des forêts boréales. Chaque étape de la succession écologique peut s'expliquer par la disparition successive des espèces pionnières intolérantes à l'ombre et les espèces tolérantes à l'ombre qui deviennent de plus en plus abondantes et dominent alors le couvert forestier (Bergeron & Dubue, 1988). Les espèces sont classées en fonction du temps pendant lequel elles sont capables de persister dans la forêt. Ainsi, on a les espèces pionnières qui sont les premières à investir le milieu après de fortes perturbations comme un feu ou une coupe (Anyomi et al., 2022). Ces espèces sont dites « opportunistes », elles ont généralement une croissance rapide et une durée de vie courte. Il s'agit souvent de feuillus (ex : peuplier, bouleaux) qui se reproduisent à partir de drageons ou de conifères à cônes sérotineux (ex : pin gris). Des espèces à cônes semi-sérotineux comme l'épinette noire peuvent aussi conquérir le milieu rapidement après un feu, cependant ces espèces vont grandir lentement en sous-bois avant de progressivement devenir l'espèce dominante de la forêt. Les espèces avec une croissance plus lente et une durée de vie plus longue se développent dans les stades de succession intermédiaires et tardifs (ex : épinette noire, épinette blanche, sapin baumier), ce sont des espèces dites « conservatrices » (Anyomi et al., 2022). Il est important de considérer que ce classement est un gradient, ainsi une espèce peut être considérée plus conservatrice ou acquiescente qu'une autre.

Une recherche menée proche de notre site d'étude a classé les espèces de la plus courte à la plus longue durée de présence dans la succession écologique. Ainsi, on trouve d'abord les pins gris, puis les peupliers faux-trembles, l'épinette blanche ; les bouleaux à papier, les pins rouges, les pins blancs ; l'épinette noire ; le sapin baumier ; le thuya occidental (Bergeron & Dubue, 1988). Par ailleurs, la dynamique de peuplements du lac Duparquet issu de feu peut être caractérisée par trois étapes importantes de succession. D'abord, les peuplements post-incendie sont dominés par les feuillus, puis on observe le déclin de la première cohorte de peupliers faux-trembles. Ensuite, le recrutement des cohortes suivantes de peupliers faux-trembles qui sont dominées par des essences mixtes. Enfin les peuplements sont de plus en plus dominés par les espèces conifères (Bergeron, 2000).

Il est important de noter que la succession écologique seule ne peut expliquer complètement la résilience³ et la productivité des écosystèmes forestiers boréaux, surtout dans un contexte de

³ « La résilience est la capacité d'un système à supporter les perturbations et à se réorganiser tout en subissant des changements, de manière à conserver essentiellement les mêmes fonctions, structure, identité et boucles rétroactives. » (Walker et al., 2004)(trad)

changement climatique, impactant les régimes de feux et la composition de la forêt boréale (Triviño et al., 2023).

L'écologie fonctionnelle permet d'approfondir la compréhension globale des stratégies écologiques, notamment en étudiant les variations stratégiques en fonction des variations saisonnières.

2. Cycle phénologique

La phénologie, du grec "phainomai" = apparaître, est l'étude de phénomènes récurrents variant de manière saisonnière en fonction des facteurs biotiques et abiotiques (Forrest & Miller-Rushing, 2010; Silvestro et al., 2025). Les espèces d'arbres boréales suivent toutes un cycle phénologique similaire : une longue période de dormance durant laquelle la croissance est interrompue et l'activité métabolique est réduite, et une période d'activité lors de laquelle se déroule la croissance I et II (Silvestro et al., 2025). La croissance I désigne l'activité des méristèmes I se trouvant à l'apex des tiges et des racines, ainsi qu'à la base ou à l'apex des feuilles, en fonction des espèces. La croissance II correspond à l'activité des méristèmes II, plus particulièrement le cambium, situé dans les tiges et les grosses racines, permettant l'épaississement des organes.

La phénologie des arbres est influencée par différents facteurs environnementaux comme la photopériode (Chuine et al., 2010; Way & Montgomery, 2015) les températures, les précipitations (Yun et al., 2018) la génétique et des facteurs internes. En effet, un certain nombre de jour à température froide (chilling) est nécessaire pour sortir de la dormance stricte puis des jours de température chaude pour permettre le débourrement, soit l'éclosion des bourgeons (Chu et al., 2023; Delpierre et al., 2019). De plus, au printemps, le cambium est réactivé avec l'augmentation des températures et de la photopériode qui stimulent la production d'auxine au niveau des bourgeons en développement et des jeunes tissus apicaux. Le transport de l'auxine vers la partie inférieure de la tige crée un gradient hormonal qui déclenche la division des cellules cambiales et favorise la différenciation des cellules du xylème et du phloème (Buttò, Deslauriers, et al., 2020).

Le changement climatique peut ainsi impacter la phénologie des arbres. Par exemple, les espèces à la phénologie précoce poussant à des températures printanières basses, vont avoir tendance à croître plus tôt avec l'augmentation des températures (Chu et al., 2023).

Ainsi, la phénologie permet d'observer les stratégies écologiques adoptées en fonction des variations environnementales.

3. Stratégies et traits fonctionnels du bois

Les stratégies des arbres se reflètent dans leur anatomie et notamment dans les traits fonctionnels (Adler et al., 2014). C'est pourquoi, les traits⁴ du bois ont fait l'objet de notre étude. De plus, l'étude de plusieurs traits (les traits peuvent être combinés entre eux) peut permettre de mieux comprendre la complexité et la diversité des réponses d'un organisme (Nock et al., 2016).

a. Anatomie du bois

Les conifères se distinguent des feuillus par une structure de base plus simple. Ils ne possèdent que deux types de cellules : les trachéides pour le transport de la sève et le soutien mécanique (et les canaux résinifères qui ne sont pas présents chez toutes les espèces) et les cellules de parenchyme pour

⁴ « Un trait est toute caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable au niveau individuel - de la cellule à l'organisme entier indépendamment de l'environnement ou de tout autre niveau d'organisation. » (Violle et al., 2007)(trad)

le stockage des réserves (Wiedenhoef, 2010; Wiedenhoef & Miller, 2005). Les feuillus assurent le transport de la sève brute via de larges vaisseaux et le stockage des réserves dans les cellules de parenchymes. De plus, ils ont des cellules ayant pour seule fonction le soutien mécanique de la plante : les fibres (Wiedenhoef, 2010; Wiedenhoef & Miller, 2005). La manière dont sont agencées les vaisseaux permet de distinguer plusieurs groupes : les bois à pores diffus, les bois à zones poreuses et les bois à pores semi-diffus (Lemire, 2024). Ces deux premiers groupes adoptent des stratégies d'allocation des ressources différentes face à des conditions de stress hydrique semblables tout en ayant une baisse de productivité similaire (Buttó et al., 2021). Ainsi, la porosité du bois est un facteur jouant dans la sensibilité des arbres à l'intensification des événements climatiques extrêmes comme les sécheresses (D'Orangeville et al., 2022). On remarque donc que la porosité est un trait du bois, reflétant les stratégies écologiques.

Les différences entre les conifères et les feuillus s'illustrent par leur différence en termes de faiblesse face à la cavitation⁵, leurs cellules conductrices de sève ayant une différence de taille et de nombre (Brodribb et al., 2012; Sperry et al., 2006). Ainsi, les stratégies différentes illustrent des compromis entre sécurité hydraulique et efficacité fonctionnelle : les conifères sont moins sujets à l'embolie (trachéides petites) que les feuillus (vaisseaux de grandes tailles). Cependant, ils ont une plus faible capacité de réparation des embolies que les feuillus (Johnson et al., 2012).

Ainsi, les feuillus ont tendance à avoir une croissance rapide, notamment grâce à leurs larges vaisseaux qui permettent le transport rapide et efficace des ressources à travers la plante. Les conifères, quant à eux, transportent la sève à travers des trachéides, petites, résistantes, relativement moins efficaces et qui prennent plus de temps à se former. Cependant, le nombre de trachéides fonctionnelles est plus important.

Il est aussi important de noter que le changement climatique impacte les traits anatomiques du bois puisque les conditions environnementales de croissance sont changeantes. Plusieurs études cherchent à voir l'impact du changement climatique sur les traits fonctionnels des arbres de la forêt boréale. Par exemple, dans le nord de la forêt boréale, une température moyenne plus élevée au printemps et durant l'été, stimulerait la largeur des cernes, le nombre de cellules par cernes et l'épaisseur des parois cellulaires de l'épinette noire (Puchi et al., 2020). Par ailleurs, le stress hydrique entrainerait une diminution de la taille des lumens des trachéides, cela pourrait donc supplanter les effets « positifs » de l'augmentation des températures moyennes. De manière plus générale, l'augmentation des températures pourrait changer les dates de début et de fin de la saison de croissance, allongeant la période de fragilité des arbres. Le changement climatique affecterait aussi la qualité du bois en modifiant la densité du bois, par altération de la formation du bois de printemps et du bois d'été, dépendant des espèces (Zhang et al., 2020).

b. La formation du bois : xylogénèse

Dans cette étude, c'est la croissance du bois dont le processus est décrit dans ce paragraphe qui a été étudié.

Le bois est formé lors de la xylogénèse (du grec xylon=bois et genesis=création), par une succession de plusieurs étapes : la division cellulaire, l'élargissement et l'élongation cellulaire, la formation et l'épaississement de la paroi secondaire, la lignification des parois, la mort cellulaire programmée (apoptose) (Cuny & Rathgeber, 2014; Déjardin et al., 2010; Plomion et al., 2001). Les cellules de parenchymes ne subissent pas la mort cellulaire programmée. Cependant, quand les cellules de parenchyme vieillissent, elles finissent par perdre leur fonctionnalité, mourir et relâcher des composés

⁵ Formation de bulles de gaz au sein des éléments conducteurs de sève

phénoliques - imprégnant les cellules adjacentes - qui contribuent à la formation de bois de cœur (Déjardin et al., 2010; Taylor et al., 2002).

- La zone cambiale, le cambium et la division cellulaire

Les cellules de bois sont issues du cambium, un méristème secondaire, présent dans les pousses et les racines. L'activité cambiale saisonnière permet de renouveler le xylème et le phloème fonctionnels (Plomion et al., 2001). On distingue le cambium de la zone cambiale qui comprend le cambium au sens strict et les cellules mères du xylème et du phloème, issues de la division du cambium (Lachaud et al., 1999). Le cambium au sens strict est composé d'une couche de cellules juvéniles, appelées initiales (Pallardy, 2010). On discerne deux types d'initiales : les initiales radiales (10-40% du cambium), courtes et isodiamétriques qui sont à l'origine des éléments radiaux du bois et les initiales fusiformes (60-90%), longues et effilées produisant les éléments longitudinaux du bois (Cuny & Rathgeber, 2014).

Lors de la division cellulaire, les initiales peuvent se diviser de façon péricline (selon un plan tangentiel) formant de nouvelles cellules-filles de bois et de liber, ou anticline, afin de maintenir la croissance du diamètre du cambium et l'équilibre entre les différents types d'initiales (Cuny & Rathgeber, 2014; Lachaud et al., 1999). Les divisions transversales permettent de former deux cellules initiales radiales à partir d'une cellule fusiforme.

- La différenciation cellulaire

Les cellules-filles formées à partir des initiales vont ensuite se différencier en passant par plusieurs étapes afin d'acquérir les caractéristiques relatives à leur fonction. Tout d'abord, la cellule s'allonge sous l'effet de l'entrée d'eau dans son contenu cellulaire et l'assouplissement de sa paroi I (Schopfer, 2006). Dans un même temps, de la paroi I nouvellement synthétisée, est déposée pour éviter une rupture de la paroi I sous la pression de turgescence (Cuny & Rathgeber, 2014). Ensuite, la cellule ayant atteint sa taille finale, la paroi II est formée suite à l'expression de plusieurs gènes impliqués dans la biosynthèse et l'assemblage de ses composants majeurs (Plomion et al., 2001). La paroi II - constituée de cellulose, d'hémicellulose, des pectines, de la lignine et d'autres protéines - est assemblée contre la paroi primaire sous forme de trois couches (Pallardy, 2010). Cependant, des portions sans paroi II sont conservées, ce sont des ponctuations qui permettent la communication ainsi que le transport d'eau et de nutriments entre les cellules (éléments de vaisseaux, trachéides, parenchyme) adjacentes (Déjardin et al., 2010). À la suite du dépôt de la paroi II, le processus de lignification, c'est-à-dire le dépôt de lignine dans les vides de la paroi cellulaire (lamelle moyenne, paroi I, paroi II), débute en commençant par les coins de la cellule et progressant de la lamelle moyenne vers la paroi I et II (Cuny & Rathgeber, 2014; Déjardin et al., 2010). La lignification de la paroi cellulaire permet de rendre la cellule plus rigide, résistante et imperméable (Zhong & Ye, 2015). Enfin, les cellules des éléments conducteurs et de soutien du xylème (trachéides ; vaisseaux et fibres) subissent une mort cellulaire programmée, ou apoptose (Cuny & Rathgeber, 2014; Déjardin et al., 2010; Pallardy, 2010). L'apoptose consiste en la production des hydrolases dans la cellule stimulée par différents facteurs internes, puis un signal entraîne l'activation de ces hydrolases et la destruction du contenu cellulaire mais pas de la paroi II (Plomion et al., 2001).

- Différences dans la structure du bois

La formation et la structure du bois varient au cours de la saison de croissance et du processus de vieillissement de l'arbre et en fonction des conditions environnementales. Par exemple, la formation réaction (bois n'ayant pas la même structure que le bois normal), appelé bois de compression chez les conifères et bois de tension chez les feuillus, occure à la suite de pressions mécaniques spécifiques (ex : la gravité) afin de maintenir ou rectifier l'inclinaison du tronc (Du & Yamamoto, 2007). Le bois initial, formé pendant le printemps, présente des différences anatomiques avec le bois final, formé

durant l'été quand le cambium est moins actif impliquant une pression de turgescence plus faible (Traversari et al., 2022). Ainsi, le bois final est plus dense avec des fibres ou trachéïdes plus petites, des parois plus épaisses et un lumen plus petit (Déjardin et al., 2010; Rossi et al., 2016). Le cambium juvénile (jeune arbre, ou partie apicale d'un arbre plus vieux) produit un bois juvénile qui est moins dense, plus souple et moins résistant qu'un bois mature (Plomion et al., 2001).

C. Choix et caractéristiques des espèces étudiées

Les espèces choisies pour cette étude sont l'épinette noire et le peuplier faux-tremble, en raison de leurs stratégies de croissance et d'utilisation des ressources très différentes et de leur présence au sein de même peuplement dans la FERLD. L'épinette noire est un peu particulière. En effet, elle se trouve à tous les stades de la succession écologique puisqu'elle peut se reproduire à la fois par des graines mais aussi par des marcottes.

L'objectif de cette étude est donc de comparer la croissance du bois de printemps du peuplier faux-tremble, une espèce considérée plus acquisitrice que l'épinette noire qui serait donc plus conservatrice. Le but est d'avoir une meilleure compréhension des réponses de croissance de ces deux espèces pour les mêmes variations météorologiques.

Hypothèses : Le peuplier faux-tremble aura une croissance plus rapide avec la production de grands vaisseaux et moins de fibres, traduisant une stratégie d'utilisation rapide des ressources par la maximisation de leur transport. À l'inverse, la formation des cellules de bois de l'épinette noire sera plus lente, reflétant une stratégie plus stable axée sur la durabilité et la résistance structurelle.

II. Matériels et Méthodes

Les données ont été récoltées et traitées selon les protocoles détaillés dans les parties suivantes. Une liste du matériel utilisé est disponible en Annexe 2. J'ai eu la chance de réaliser l'intégralité du travail de terrain et de laboratoire avec Hailey Krackovitch-Pellatt.

A. Phase terrain

1. Pré-requis pour la phase de terrain

a. Formations

Afin de pouvoir réaliser les travaux de terrain en toute sécurité, des pré-requis sont exigés par l'UQAT. Ainsi, des formations sur les premiers secours, la conduite de camionnette et sur les bonnes pratiques en milieu extérieur ont été dispensées par l'organisme pour les stagiaires. J'ai ainsi pu acquérir les bases en termes d'orientation à l'aide d'une balise GPS et d'une boussole, de conduite de véhicule de terrain et de gestes de premier secours en milieu isolé.

b. Choix des placettes

Les placettes⁶ choisies se situent sur le territoire de la FERLD, pour des raisons de praticité telles que la proximité aux sites d'études, les échantillonnages ayant lieu chaque semaine. La FERLD se situe à côté du lac Hébécourt (48° 30' 15" N, 79° 23' 28" O.) et du lac Duparquet (48° 28' 33" N, 79° 15' 30" O). La station météorologique la plus proche de notre zone d'étude est celle de La Sarre, à environ 42 km au nord. Le climat est de type tempéré froid, avec une température annuelle moyenne (1971-2000) de

⁶ Petite surface de forêt choisie comme étant représentative d'une zone plus étendue (Conseil international de la langue française, 1978)

0,7°C et des précipitations annuelles moyennes de 889,8 mm (Environnement et ressources naturelles Canada, 2025).

Afin de choisir les placettes, nous avons utilisés les données de l’inventaire écoforestier (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024). A l’aide d’un logiciel de cartographie (QGIS) et de R, un tri des peuplements a été réalisé afin de sélectionner ceux à visiter afin de se rendre compte de la réalité du terrain. À la suite de ce pré-terrain, trois sites (Figure 1) ont été sélectionnés selon différents critères de sélection :

- Peuplement avec les deux espèces étudiées présentes
- Peuplement relativement jeune (âge inférieur à 40 ans)
- Peuplement présentant des individus en santé
- Peuplement accessible facilement depuis les chemins forestiers

Tableau 1 : Principales caractéristiques des peuplements choisis pour l’étude

Placette	Age (ans)	Groupe ment d’essence	Dépôt de surface	Densité du peuplement (en %)	Drainage	Pente (en %)
A	0-20	FXRZ	R4GA	85-95	Modéré	9-15
B	21-40	PERZ	4GA	85-95	Modéré	9-15
C	21-40	PEEN	4GA	85-95	Imparfait	4-8

Source des données : (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024)

Ainsi, les placettes se ressemblent pour leur type de dépôt de surface qui est glaciolacustre (faciès d’eau peu profonde) et la densité du peuplement comprise entre 85 et 95%. Leur classe de pente, d’âge et de drainage présentent une légère différence entre les sites A et B et le site C (Tableau 1). Les placettes se différencient principalement par leurs compositions différentes avec des dominantes de feuillus indéterminés (FX) ou de peupliers (PE) et une dominante secondaire de résineux plantés indéterminés (RZ) ou d’épinettes noires (EN). Ces informations sont issues de photo-interprétation et ne reflètent donc pas totalement la réalité. Ainsi, les placettes ont été sélectionnées dans des peuplements présentant les deux espèces dans des proportions légèrement différentes.



Figure 1 : Site d’études A, B et C

Les placettes se situent également le long d’un transect latitudinal (Figure 2).

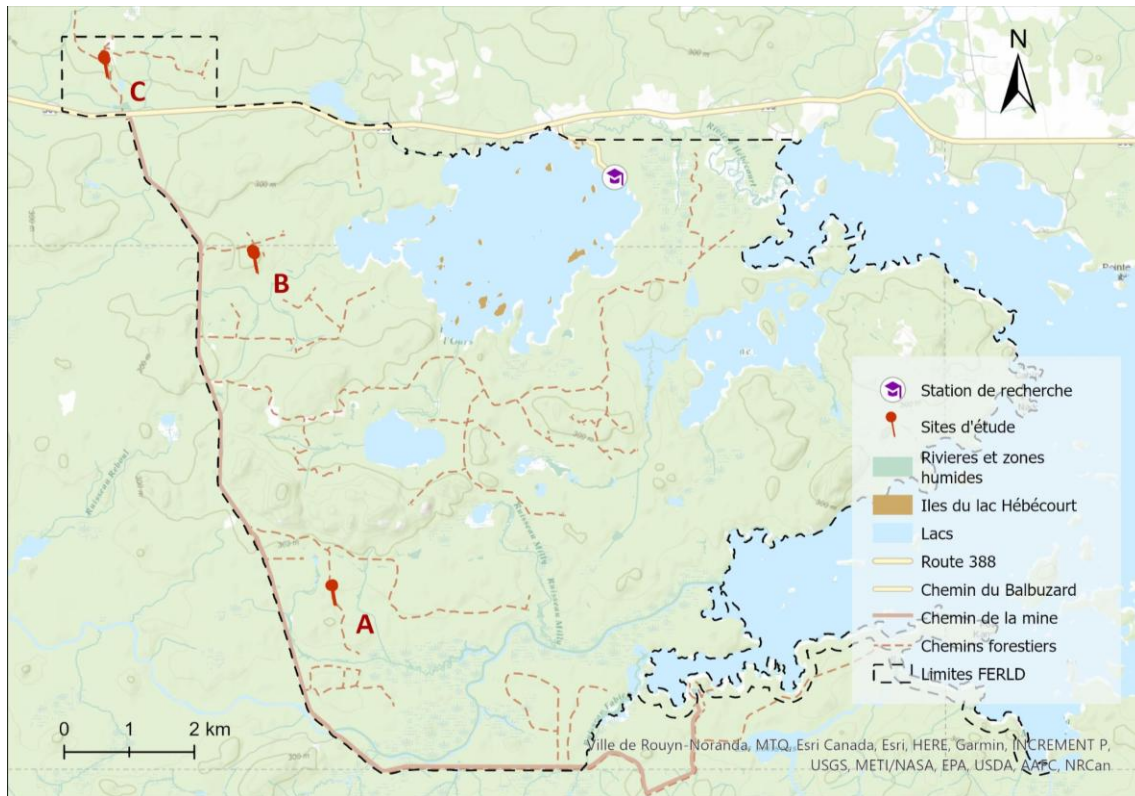


Figure 2 : Localisation des différents sites d'étude dans le périmètre de la FERLD, au Québec, Canada

2. Mise en place et déroulé du protocole terrain

a. Sélection et caractéristiques des individus étudiés

Les individus étudiés ont été choisis par paire avec ma tutrice de stage, un peuplier faux-tremble et une épinette noire éloignés l'un de l'autre de quelques mètres (critère 1), les arbres semblant le plus en santé et le plus droit (critère 1bis) et un diamètre le plus similaire possible (critère 2). On a ainsi sélectionné 5 paires d'individus par site lors du premier échantillonnage. En général, entre 4 et 10 individus sont choisis dans la plupart des études (e.g. (Buttò, Shishov, et al., 2020; Rossi et al., 2007)). De plus, afin de caractériser les individus sélectionnés, des carottes ont été prélevées à l'aide d'une tarière de Pressler afin d'estimer leur âge, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur ont été mesurées à l'aide respectivement d'un mètre de circonférence et d'un hypsomètre (Figure 3).



Figure 3 : Utilisation des outils pour la caractérisation des arbres étudiés (a): tarière de Pressler, (b) : Mètre de circonférence, (c) : hypsomètre

b. Calendrier et protocole d'échantillonnage

L'échantillonnage est généralement réalisé de manière hebdomadaire ou bi-hebdomadaire (Prislan et al., 2022) avant le début de la saison de croissance jusqu'à la maturation complète des cellules du xylème. Dans le cas de ce projet, les échantillonnages de microcarotte de bois ont eu lieu toutes les semaines entre fin mai et début août selon le calendrier suivant (Tableau 2). La durée d'échantillonnage, pour ce projet, est plus courte que la saison de croissance en raison des dates de stage. Cependant, la période d'échantillonnage correspond à la période où on observe le pic de la production du bois en forêt boréale, qui a lieu vers le solstice d'été (Rossi, Deslauriers, et al., 2006).

Tableau 2 : Calendrier d'échantillonnage et conditions météorologiques

Date	Tâches réalisées	Conditions météorologiques
29/05	Microcarottage, mesure du DHP, tarière de Pressler	Pas de pluie, couvert
30/05	Photo de la canopée, mesure DHP, tarière de Pressler	Pluie
02/06	Microcarottage, photo de la canopée	Ensoleillé
09/06	Microcarottage, photo de la canopée	Averses éparses
16/06	Microcarottage, photo de la canopée	Ensoleillé
23/06	Microcarottage, photo de la canopée	Orageux, quelques éclaircies
30/06	Microcarottage, photo de la canopée	Ensoleillé, rares averses
07/07	Microcarottage, photo de la canopée	Ensoleillé
14/07	Microcarottage, photo de la canopée	Couvert
21/07	Microcarottage, photo de la canopée, mesure des hauteurs	Ensoleillé
28/07	Microcarottage, photo de la canopée, mesure des hauteurs	Pluie
04/08	Microcarottage, photo de la canopée	Ensoleillé
11/08	Microcarottage, photo de la canopée (réalisé par Hailey)	-

Au fil du temps, différents outils de prélèvement du bois en formation ont été utilisés tels que les ciseaux à bois, des emporte-pièces puis différentes seringues pour biopsie osseuse (Harroué et al.,

2011). Alors que les deux premières manières de prélever sont très destructives, la dernière l'est moins mais elle est peu adaptée au prélèvement du bois.

Il existe également trois outils spécialisés conçus pour le microcarottage de bois : Le marteau emporte-pièce, l'incrément puncher et le trephor (Rossi, Anfodillo, et al., 2006). Les prélèvements effectués avec les deux premiers outils sont plus fragiles que ceux effectués avec le trephor.

Dans le cas de ce protocole, l'outil choisi est donc le trephor car il permet d'obtenir des échantillons de qualité pour les espèces de bois de feuillus et de bois de résineux et de minimiser les dommages causés aux arbres tout en ayant une forme ergonomique et robuste permettant une utilisation simple et sécuritaire (Rossi, Anfodillo, et al., 2006).

Deux microcarottes (petit échantillon de bois prélevé dans le tronc et de forme cylindrique) ont été prélevées pour chaque individu dans le cas où l'une d'elle serait endommagée lors du transport ou de la phase de laboratoire (Prislan et al., 2022). Pour chaque individu étudié, l'écorce est retirée si elle est trop épaisse à l'aide d'un couteau. Il est également important d'éviter les nœuds, ou toutes anomalies présentes sur le tronc. Puis positionner l'embout découpeur du trephor perpendiculairement au tronc, au niveau du DHP, et taper à l'aide d'un maillet sur l'extrémité plate (Figure 4.1). Afin d'améliorer la qualité de l'échantillon, il est recommandé de limiter le nombre de coups et d'être le plus stable possible. Ensuite, le trephor est retiré à l'aide de ses bras asymétriques à la manière d'un tire-bouchon (Figure 4.2). La microcarotte contenue dans le tube extracteur est poussée délicatement à l'aide d'une tige métallique dans la chambre d'extraction (Figure 4.3). Puis, la microcarotte est placée écorce vers le bas (pour permettre la manipulation par la partie bois lors de la phase de laboratoire et ainsi limiter le risque d'abimer le cambium), dans un eppendorf, contenant une solution d'éthanol à 50% et préalablement labellisé selon la norme suivante : IDsiteIDespècesIDindividu_IDdate (*exemple : la première microcarotte du peuplier 1 sur le site A sera nommée AP1_1*) (Figure 4.4).

Il est conseillé de nettoyer la tête du trephor à l'aide d'un chiffon et d'alcool, le plus souvent possible afin de limiter les restes de résines dans l'appareil et l'entrée de pathogènes dans l'arbre.



Figure 4 : Étapes de prélèvement des microcarottes de bois, (1) : enfoncer le trephor dans le tronc à l'aide du maillet, (2) : retirer le trephor, (3) : faire coulisser la microcarotte dans la chambre d'extraction à l'aide de l'extracteur, (4) : mettre la microcarotte dans un tube eppendorf

Enfin, des photos de la canopée de chaque peuplier ont été prises chaque semaine afin de voir les différents stades de débourrement.

B. Phase laboratoire

Une formation sur le Système d'Information sur les Matières Dangereuses Utilisées au Travail (SIMDUT) a été suivie en ligne afin de pouvoir travailler en laboratoire. La phase laboratoire a été réalisée en simultanée avec les prélèvements sur terrain, car c'est un processus laborieux et chronophage.

1. Elaboration du protocole et tests préalables

Le protocole suivi a été élaboré à partir de différents protocoles scientifiques (Deslauriers et al., 2015; Fonti et al., 2025; Harroué et al., 2011; Langdon, 1920; Prislán et al., 2022; Rossi, Anfodillo, et al., 2006) et adapté afin de répondre aux contraintes en termes de temporalité et de matériel. Par exemple, l'étape d'infiltration des échantillons se réalise généralement à l'aide d'un processeur de tissu. Cependant, cette machine n'est pas présente au sein du laboratoire de la station de recherche. Ainsi, le temps des bains a été adapté après la lecture de différents articles (Tableau 3) et un dispositif a été imaginé afin de permettre l'agitation magnétique des solutions tout en préservant les échantillons. Ce dispositif, posé au fond du bécher, consiste en une pièce d'aluminium de forme ronde avec un léger rebord pour permettre au barreau aimanté de tourner. Elle est trouée sur le dessus afin de permettre au fluide de circuler.

De plus, le nombre de bains a été réfléchi afin de correspondre au nombre de béchers disponibles, ainsi que pour permettre une gestion du temps au laboratoire optimale.

Tableau 3 : Comparaison des différents protocoles d'infiltration de paraffine

	Langdon	Rossi	Harroué**	Prislán*	Fonti
Ethanol 50%	-	-	4h	-	-
Ethanol 60%	12h	-	-	-	-
Ethanol 70 %	12h	2h (x2)	4h	2h	-
Ethanol 75 %	-	-	-	-	2h
Ethanol 80 %	12h				
Ethanol 90%	-	1h30 (x2)	3h	1h30	-
Ethanol 95-96 %	12h	1h30	1h30	1h30 (x2)	2h (x2)
Ethanol 100%	24h	1h30 (x2)	3h00	1h30 (x2)	2h (x2)
Clearing solvent	24h	1h30 (x3)	4h30	1h30 (x3)	2h (x2)
Paraffine	36h (ou plus)	2h (x2)	1h30 (x2)	1h20 (x3)	2h + 4h

* « Si un processeur de tissu n'est pas disponible, le protocole peut être adapté en allongeant le processus de 2 jours en laissant les échantillons dans l'alcool à 95% ou 100% pendant une nuit ».

** Quand l'infiltration est terminée, les microcarottes sont conservées dans la paraffine liquide avant de passer à l'étape de l'enrobage

De plus, afin de se familiariser avec les différentes machines à utiliser (station d'enrobage, microtome), des échantillons tests ont été récoltés infiltrés puis enrobés et enfin coupés.

2. Protocole suivi

À chaque étape du protocole, l'état d'avancement pour chaque échantillon est mis à jour dans un Excel pour faciliter le suivi du protocole.

a. Etape 1 : Préparation des échantillons

Si besoin, la microcarotte est raccourcie à l'aide d'une lame de rasoir pour ne garder que quelques cernes en plus de la partie analysée (Figure 5.1). À l'aide d'une loupe, chaque microcarotte est orientée, puis marquée au crayon de papier dans la direction des fibres du bois sur la section tangentielle de l'échantillon (Figure 5.2). L'échantillon est ensuite mis dans une microcassette pour la phase d'infiltration (Figure 5.3 et 4).

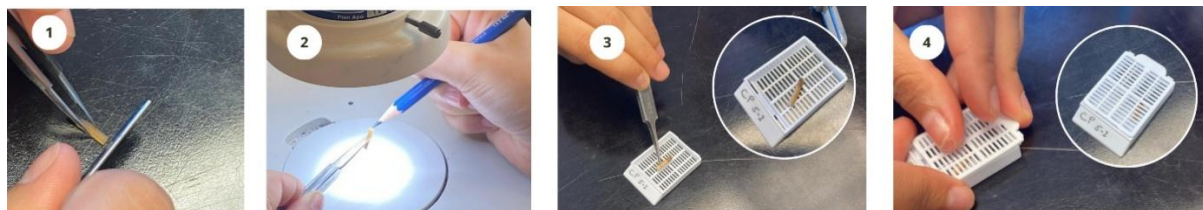


Figure 5 : Préparation et orientation des microcarottes, (1) : couper les parties non analysées de la microcarotte, (2) : marquer la microcarotte, (3) : mettre la microcarotte dans la cassette, (4) : fermer la microcassette

b. Etape 2 : Déshydratation et infiltration

Comme vu précédemment, le laboratoire n'est pas équipé d'un processeur de tissu, ainsi la procédure manuelle est décrite dans le paragraphe suivant.

Les trente microcarottes contenues dans les microcassettes sont mises successivement dans 3 baigns d'éthanol à 70%, 80%, 95% afin d'être déshydratées (Figure 6). Puis elles sont nettoyées à l'aide d'un clearing solvent (Citrosolv ou HistoClear). Elles sont ainsi plongées dans un bain de Citrosolv à 50% (dilué avec éthanol) et un bain de Citrosolv 100%. La durée de chaque bain d'éthanol et de Citrosolv est d'environ 12h. Enfin, les microcarottes sont immergées dans un bain de paraffine liquide (chauffé dans un bain-marie à 62°C) pendant un minimum 24h (Figure 6). Le niveau d'eau dans le bain marie contenant le b cher de paraffine doit être ajusté régulièrement en raison de l'évaporation de l'eau. Les microcarottes sont ensuite conservées dans de la paraffine liquide à 60°C avant l'enrobage.

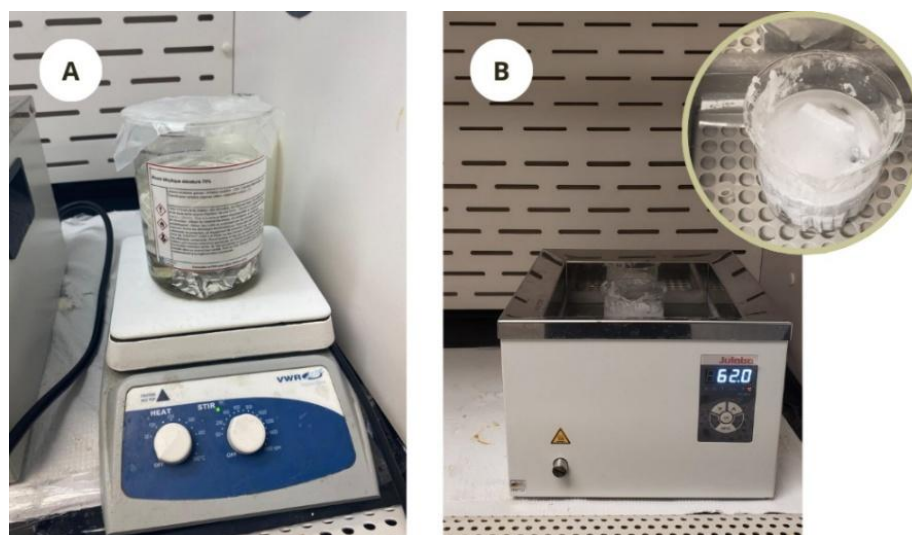


Figure 6 : Montage expérimental pour l'infiltration des microcarottes, (A) : bain d'éthanol, (B) : bain de paraffine

Les baigns sont renouvelés autant de fois que nécessaire afin de conserver leur efficacité.

c. Etape 3 : Enrobage des microcarottes

Les microcassettes sont retirées du bain de paraffine (Figure 7.1), puis mises dans le compartiment prévu à cet effet de l'enrobeuse (Amos Scientific TEC-2800) (Figure 7.2). D'abord, les microcassettes

sont ouvertes (Figure 7.3) Une première fine couche de paraffine est coulée dans le moule (Figure 7.4). Puis, une microcarotte est positionnée au fond du moule, avec les fibres du bois perpendiculaire au fond du moule, à l'aide de la marque de crayon réalisée lors de l'étape 1 (Figure 7.5). Le moule est refroidi sur la cryosole afin de fixer la microcarotte, la paraffine doit rester fluide à la surface (Figure 7.6). Positionner la base de microcassette sur le moule et couler une autre couche de paraffine à travers la microcassette (Figure 7.7). Le bloc de paraffine est ensuite refroidi sur une cryosole (Amos Scientific TEC-2800) réglée à une température entre 0 et 4°C pendant une vingtaine de minutes (Figure 7.7).

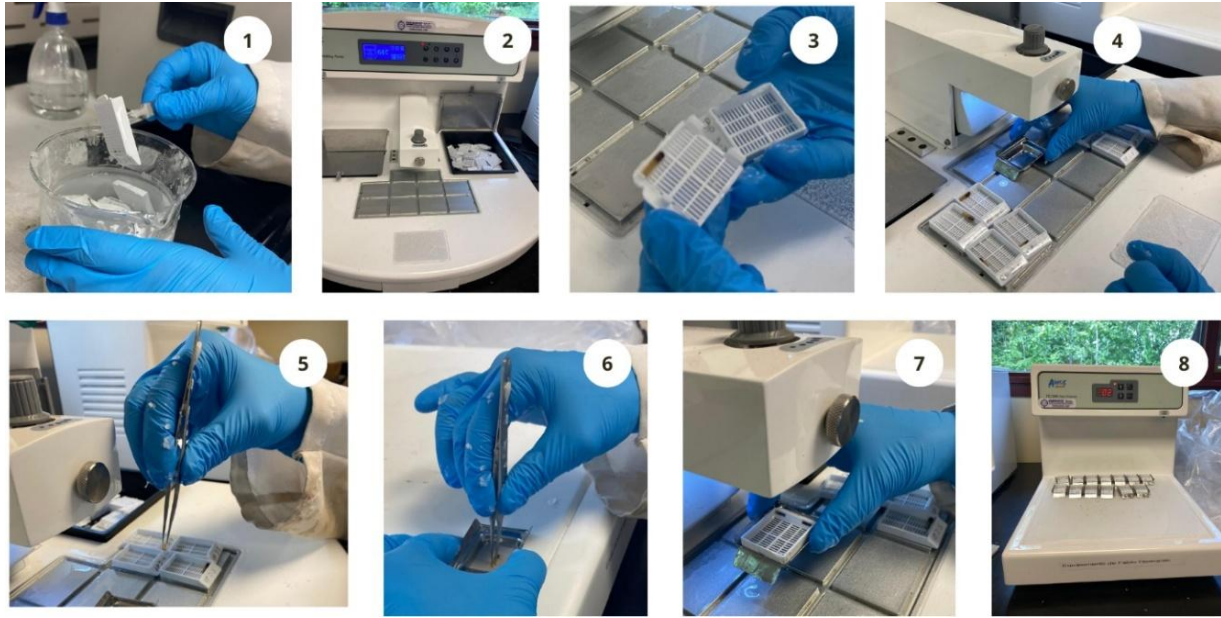


Figure 7 : Etapes de l'enrobage (1) : retirer les microcassettes du bain de paraffine, (2) : mettre les microcassettes dans l'enrobeuse, (3) : ouvrir les microcassettes, (4) : couler une première couche de paraffine, (5) : placer la microcarotte dans le moule, (6) refroidir sur la cryosole, (7) : couler de la paraffine à travers la cassette, (8) : refroidir pendant environ 20 minutes sur la cryosole

d. Etape 4 : Dégrossissage/Rabotage

Les blocs de paraffine sont démoulés et les coulures de paraffine sur les côtes des cassettes sont raclées à l'aide d'une lame de rasoir afin de favoriser la fixation du bloc sur le support du microtome (Figure 8.1 et 2).

Un bloc de paraffine est fixé sur le microtome (LEICA RM22-45) puis l'angle d'inclinaison de la lame et la finesse de la coupe (12-16 μm) sont ajustés. Une lame de microtome en acier inoxydable (FEATHER R35) est positionnée sur le porte-lame. Chaque bloc de paraffine est coupé jusqu'à exposer la surface de l'échantillon. Il faut prendre garde à ne pas couper plus de $\frac{1}{3}$ de la microcarotte (Figure 8.3).

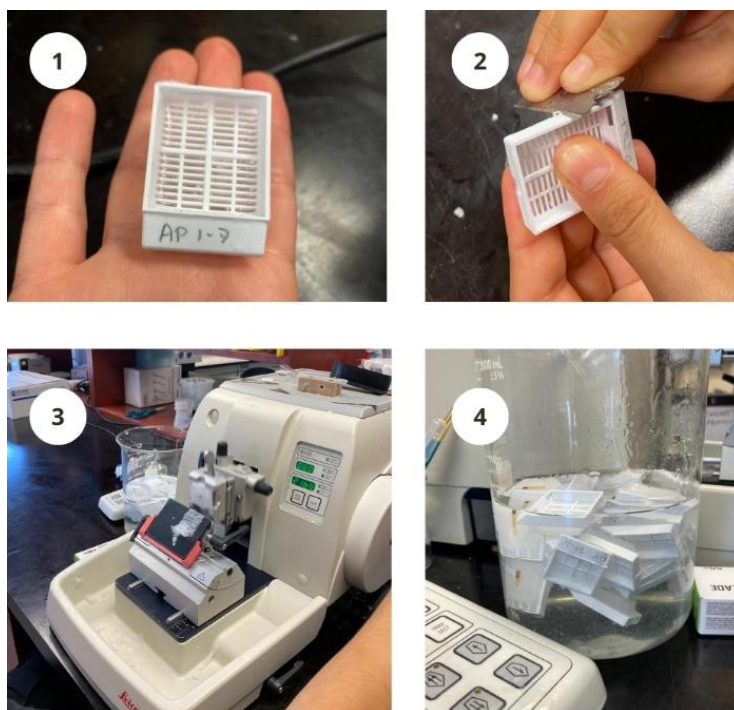


Figure 8 : Etapes du dégrossissage, (1) : cassette démoulée, (2) : racler les coulures, (3) : dégrossissage au microtome, (4) : trempage des blocs dans l'eau avec une goutte de glycérol

Une fois tous les blocs de paraffine dégrossi, ils sont mis dans l'eau (mélangée à une goutte de glycérol) à température ambiante pour une durée d'une nuit à plusieurs jours afin de ramollir le bois et durcir la paraffine (Figure 8.4).

e. Etape 5 : Coupe et préparation des échantillons

Les blocs de paraffine sont coupés un à un à une épaisseur comprise entre 7 et 8 μm à l'aide du microtome équipé de lames de microtome en acier inoxydable (FEATHER N35) (Figure 9.1). Les lames sont renouvelées régulièrement afin de maintenir la qualité des coupes. Le ruban obtenu lors de la coupe continue est récupéré à l'aide d'un pinceau ou d'une aiguille (Figure 9.2). Ce ruban de paraffine est ensuite déposé délicatement dans un bain-marie pour flottaison des sections paraffinées (MH8517X1) à 40-45°C (Figure 9.3 et 4). Les meilleures sections sont sélectionnées et glissées sur des lames de microscope (Fisher Scientific premium Superfrost) préalablement traitées avec une eau albuminée (recette en Annexe 3) (Figure 9.5). Les lames sont ensuite nettoyées pour enlever les bouts de ruban de paraffine dépassant puis nommées selon l'échantillon (Figure 9.6).

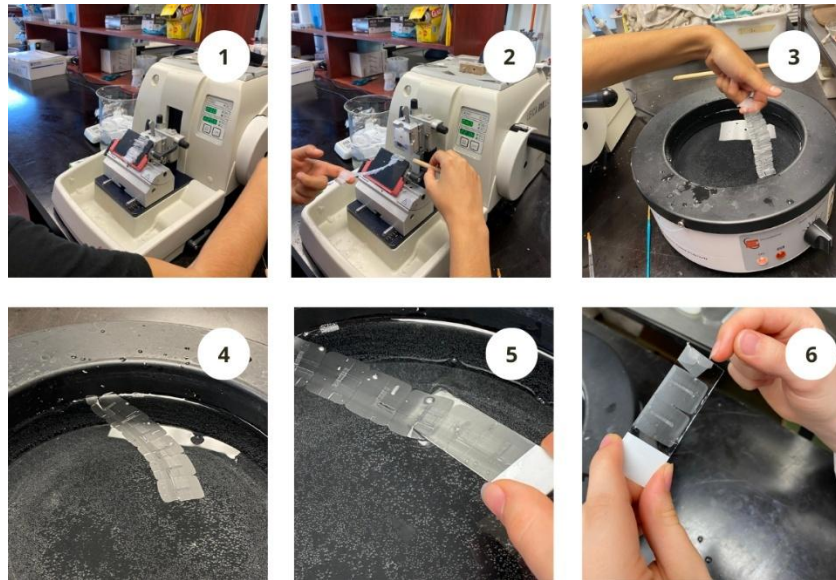


Figure 9 : Etapes de la coupe des blocs de paraffine, (1) : coupe à 7-8 μm , (2) : récupération du ruban paraffine, (3) : dépôt du ruban de paraffine dans le bain thermostaté, (4) : ruban de paraffine flottant et s'étirant, (5) : récupération du ruban sur une lame, (6) nettoyage des bords de la lame

Une première vérification de l'intégrité des coupes est effectuée à l'aide d'un microscope ce qui permet de faire un premier tri des lames jugées inexploitable et d'étirer celles qui sont pliées. Ainsi, les sections pliées peuvent être parfois dépliées à l'aide d'une aiguille sous le microscope. De plus, lorsque toutes les sections semblent mauvaises, la microcarotte enrobée est observée à la loupe binoculaire afin de détecter toute fissure ou cassure au niveau du cambium. Enfin, les lames conservées sont séchées à l'étuve à 50°C pendant minimum 1 heure.

f. Etape 6 : Coloration

Les lames sont colorées selon le protocole de Fonti, de 2015. Le poste de travail est visible en Figure 10.A. Ainsi, elles sont plongées pendant 15 minutes pour chacun des deux bains successifs de Safeclear afin de dissoudre la paraffine. Puis 15 minutes dans chacun des deux bains d'éthanol à 95% afin de laver le Safeclear. Les lames sont colorées dans un mélange de safranine, alcian blue (recette en Annexe 4) pendant 15 minutes. Enfin, les lames sont rincées pendant 3 minutes à l'eau distillée puis à l'éthanol à 95% pendant 30 secondes (Figure 10.B).

Les lames colorées sont ensuite séchées à l'air libre pendant une nuit ou tamponnées délicatement à l'aide d'un papier absorbant. Afin de conserver les lames plus longtemps, elles sont collées à l'aide d'une colle de fixation pour lame (Eukitt) puis recouvertes d'une lamelle (Figure 10.C). Les bulles d'air sont évacuées puis les lames sont laissées à l'air libre pour sécher.

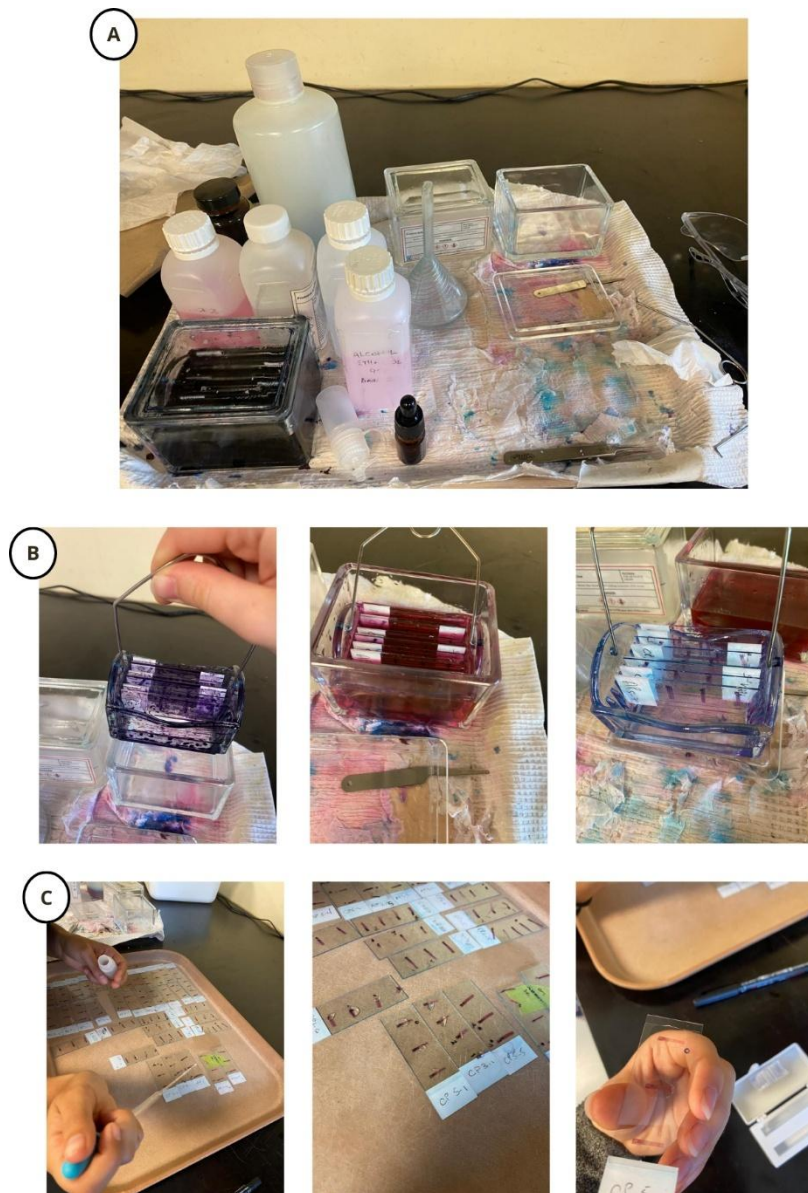


Figure 10 : Coloration et collage des lames, (A) : Configuration du matériel utilisé pour la coloration, (B) : exemple : étape du rinçage à l'éthanol, (C) étapes du collage

Le processus de laboratoire étant chronophage et fastidieux, un minimum de lames exploitables a été fixé, à raison de 3 individus par espèce par date d'échantillonnage.

g. Etape 7 : Photographie et prise de mesures

Les lames sont prises en photographie à l'aide d'une caméra Clemex et du logiciel Clemex Vision Captiva. Pour cela, une partie exploitable de la lame est sélectionnée au grossissement x100 et l'équilibrage des blancs est réalisée pour permettre la retranscription la plus fidèle possible des couleurs (en bleu : parois non lignifiées, en rose : parois lignifiées) (Figure 11).

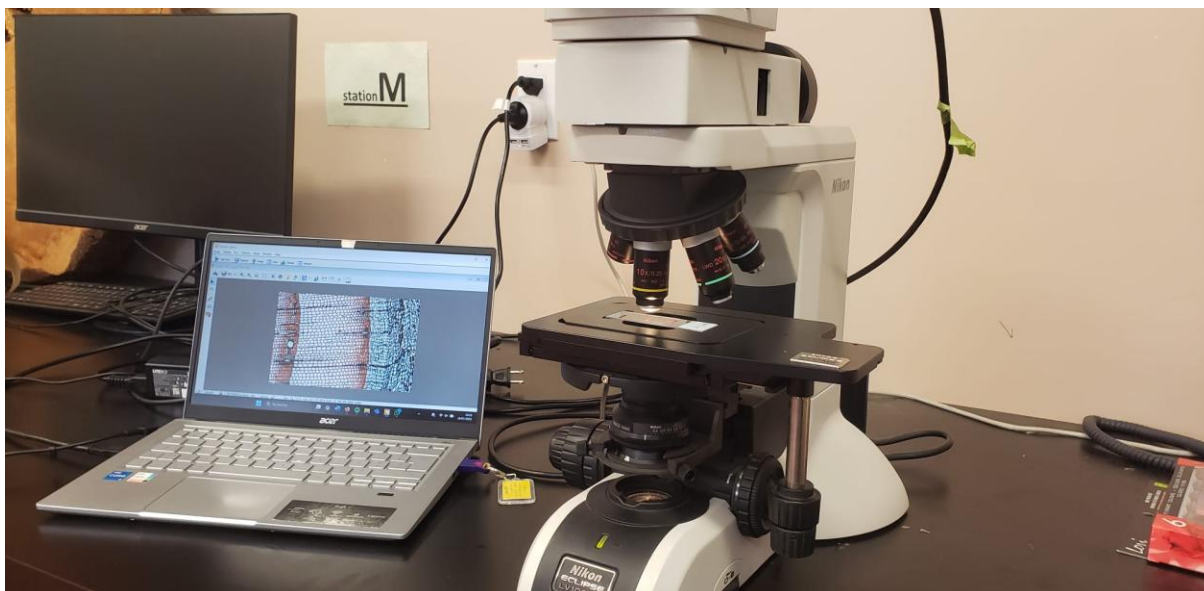


Figure 11 : Prise de photo des lames

Dans le cas où les parties de la lame étudiées (cambium, cellules en agrandissement, cellules lignifiées, cellules matures) sont trop grandes pour rentrer dans une photographie, plusieurs images sont enregistrées puis combinées avant la prise de mesures.

De plus, une photographie d'une lame de calibrage (1 division = 0,01 mm) dans la direction verticale et horizontale au grossissement x100 est également prise pour calibrer le logiciel de mesure Wincell.

La largeur des différentes zones étudiées est mesurée sous le logiciel Wincell à partir des photographies préalablement prises (Figure 12). Ainsi, le jeu de données est créé au format .txt, avec un backup de l'analyse en image au format .tiff. Les données sont ensuite révisées sous R afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'erreur et réarranger le jeu de données pour les analyses.

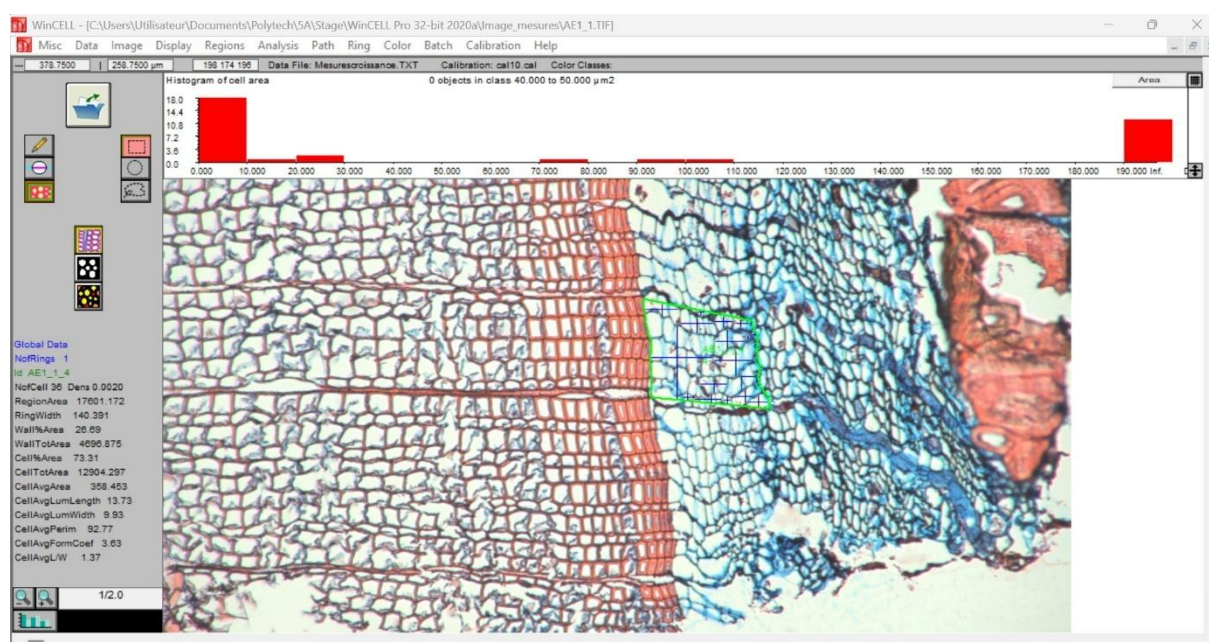


Figure 12 : Exemple de mesures sous le logiciel Wincell

III. Résultats

Les résultats présentés dans cette partie sont les données traitées pour 7 semaines de prélèvements du 29 mai au 7 juillet. Les peupliers seront désignés par la lettre P et les épinettes par la lettre E. Pour plus de facilité, le diamètre à hauteur de poitrine des troncs des individus sera désigné par le mot “diamètre” ou l'acronyme DHP.

A. Caractérisation des individus étudiés par site et par espèce

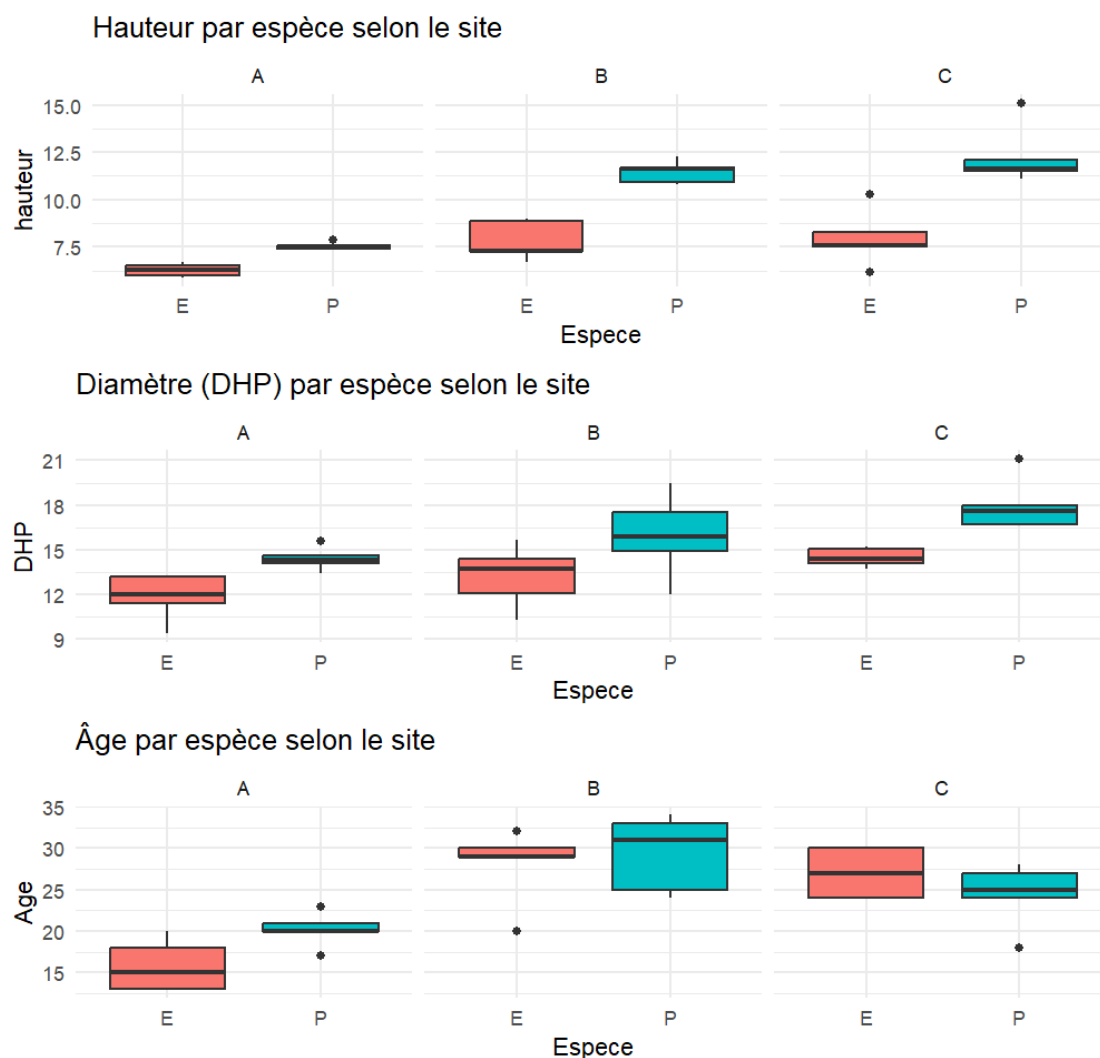


Figure 13 : Boxplots de la hauteur, du diamètre et de l'âge des individus par site et par espèce

De manière globale, il semble que la hauteur et le diamètre des individus peupliers sélectionnés soient plus grands que celle des individus épinettes choisis (Figure 13). Pour ce qui est de l'âge à part pour le site A, il ne semble pas y avoir de grandes différences entre les deux espèces. Enfin, les résultats correspondent à ce qu'indique la carte écoforestière du Québec puisque le site A est effectivement plus jeune que les sites B et C.

B. Croissance II des individus étudiés par site et par espèce

Afin d'observer la distribution des zones de développements pour chaque échantillon en fonction des espèces (P et E) et des sites (A, B ou C), nous avons réalisé un histogramme (figure x). Globalement, la largeur des zones de développement est comprise entre 0 et 400 μm (Figure 14). On peut voir que pour tous les sites et espèces, la zone de développement ayant eu la plus grande largeur est la zone cambiale excepté pour les peupliers du site C. On observe que la zone ayant eu la plus petite largeur est également la zone cambiale.

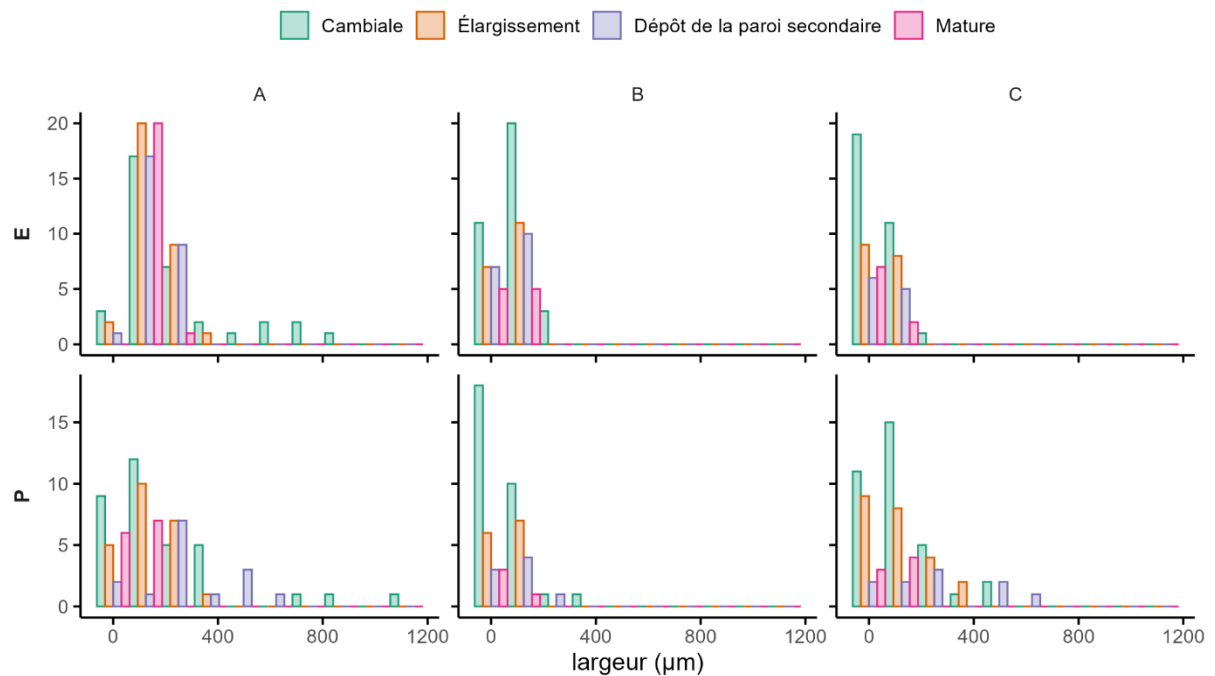


Figure 14 : Répartition des zones de développement par site et par espèce

Si on regarde l'évolution des zones de développement au fil du temps, on observe que pour le site A, plusieurs individus ont déjà commencé leur croissance au jour 149 contrairement au site B et C (Figure 15). La maturation des cellules n'est observée qu'à partir du jour 174 pour l'épinette dans les sites B et C et à partir du jour 181 pour le peuplier. D'autre part, il semblerait que la croissance du site A soit plus importante que celle des sites B et C puisque la largeur de la zone cambiale le jour 188 de plusieurs des individus du site A est plus importante ($<500\mu\text{m}$) que celle du site B et C ($>500\mu\text{m}$). Il serait donc intéressant de voir la croissance moyenne à chaque semaine pour confirmer cette observation.

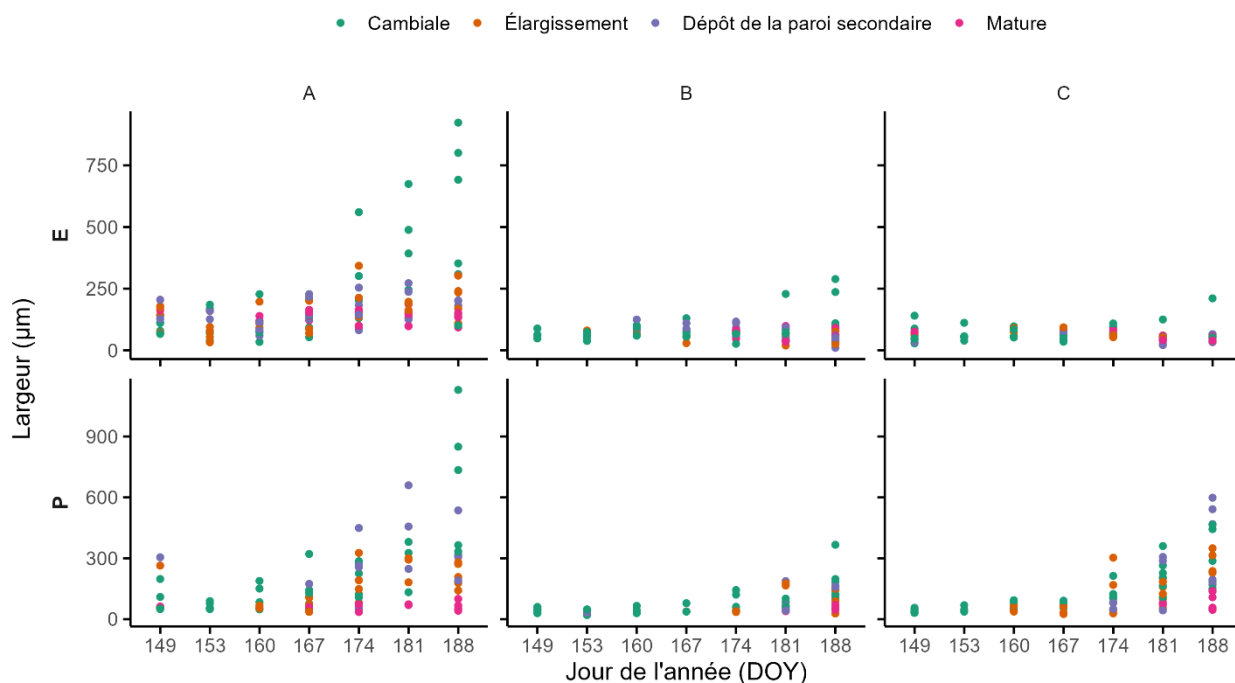


Figure 15 : Zones de développement au fil du temps (DOY) par site et par espèce

Effectivement, on observe dans la Figure 16 que la croissance totale moyenne du site A est plus importante que celle des deux autres sites. Cependant, il ne semble pas y avoir de différence très marquée de croissance entre les deux espèces étudiées, les points représentant la croissance totale moyenne étant globalement mélangés ou dans la même gamme de croissance.

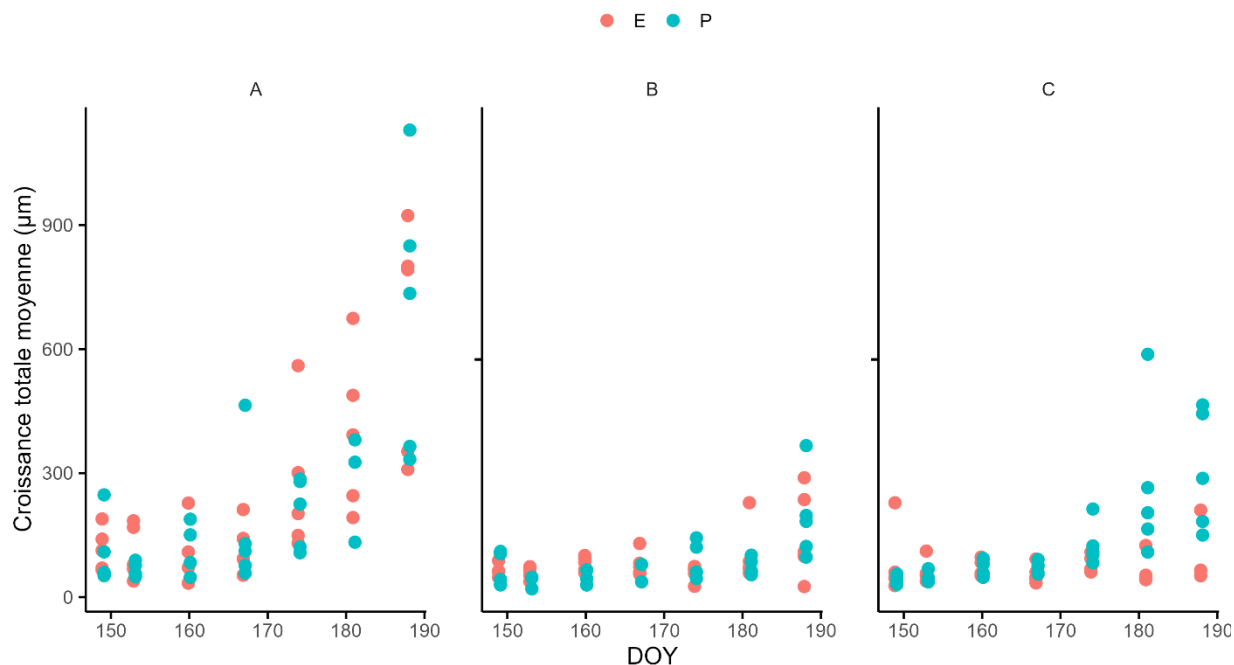


Figure 16 : Croissance totale moyenne par site et par espèce

Si on observe maintenant le taux de croissance moyen des arbres selon l'espèce et le site dans un histogramme (Figure 17), on observe des différences entre les sites. Le site A a significativement un taux de croissance moyen plus grand que le site C pour l'épinette et que le site B pour le peuplier. En effet, les barres d'erreurs indiquent la variation possible autour de cette moyenne. On a choisi de

représenter l'erreur standard au lieu de l'écart type car nous sommes intéressées à l'incertitude autour de la moyenne et pas à la moyenne de données individuelles.

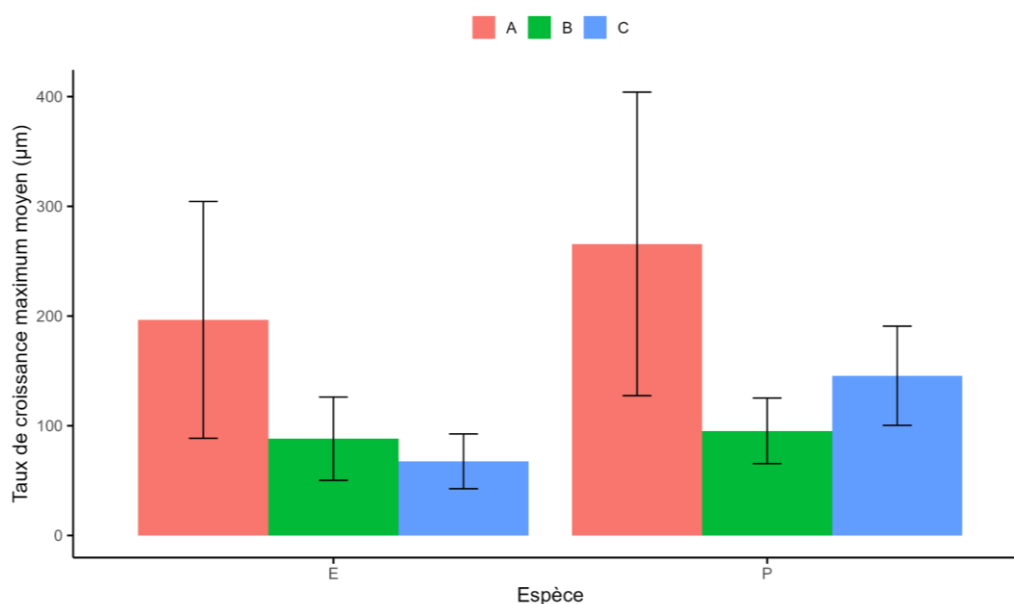


Figure 17 : Taux de croissance moyen par espèce et par site

Enfin, afin de savoir si le peuplier, ayant une stratégie plus acquisitive, pousse mieux que l'épinette selon le contexte écologique (site) et le temps (DOY), un modèle linéaire a été réalisé. Les données ont préalablement subi une transformation log afin de les normaliser. Afin d'appliquer un modèle linéaire, nous vérifions les conditions d'homoscédasticité, de linéarité, de normalité, d'absence de multicollinéarité et d'autocorrélation. Ainsi, on remarque que 95% des résidus sont dans l'intervalle ± 2 , il n'y a pas de patron dans les résidus, la variance semble homogène et les résidus suivent la ligne sur le Q-Q plot (Annexe 5), notre modèle est donc acceptable.

La croissance totale des arbres, d'après les estimations du modèle, montre une augmentation significative au cours du temps de l'étude, avec une augmentation moyenne d'environ 3,5 % par jour. Lorsqu'on les compare au site A, considéré comme site de référence, les sites B et C affichent une baisse significative de la croissance de l'épinette, avec des taux tournant autour de 41 % et 39 %, respectivement, par rapport à ceux du site A.

La différence moyenne de croissance entre le peuplier et l'épinette au site A n'est pas significative, suggérant des taux similaires sur ce site. Cependant, le peuplier croît environ 63 % plus vite comparé à l'épinette dans le site C, ce qui n'est pas le cas au site B où l'interaction n'est pas significative (Figure 18). Ces résultats montrent que la croissance dépend à la fois du moment de l'année, du site et de l'espèce, avec des effets spécifiques aux combinaisons site-espèce.

Croissance totale selon DOY, site et espèce

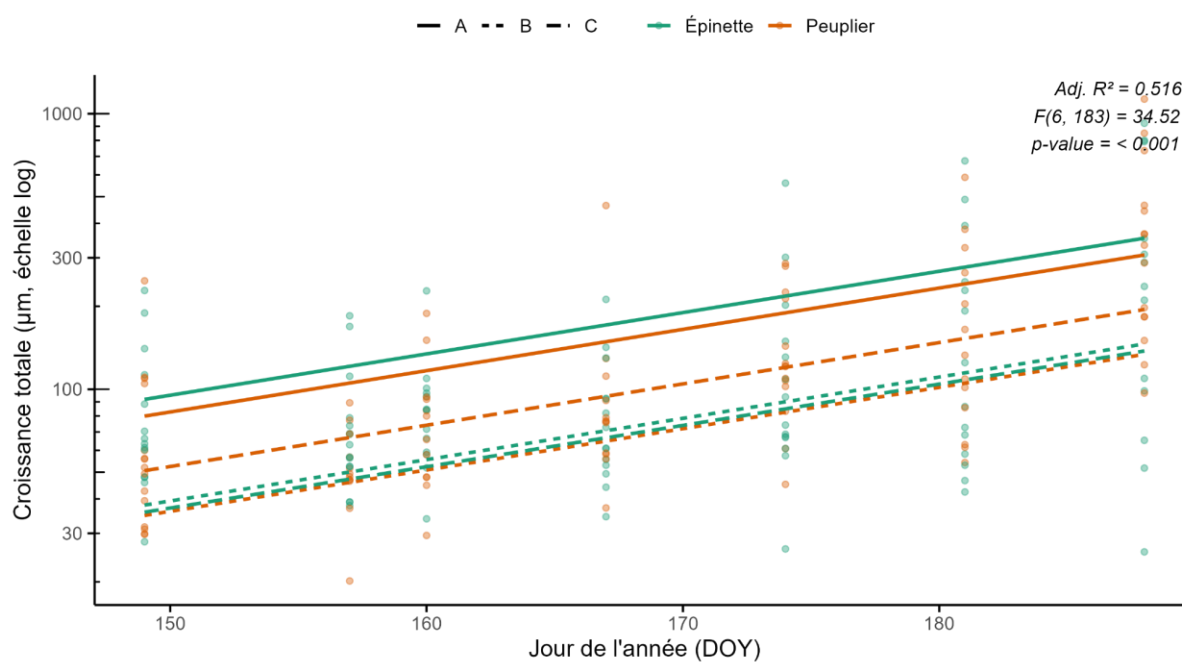


Figure 18 : Croissance totale en fonction du jour de l'année (DOY) pour chaque site et chaque espèce

C. Croissance I des individus peuplier étudiés par site et par espèce

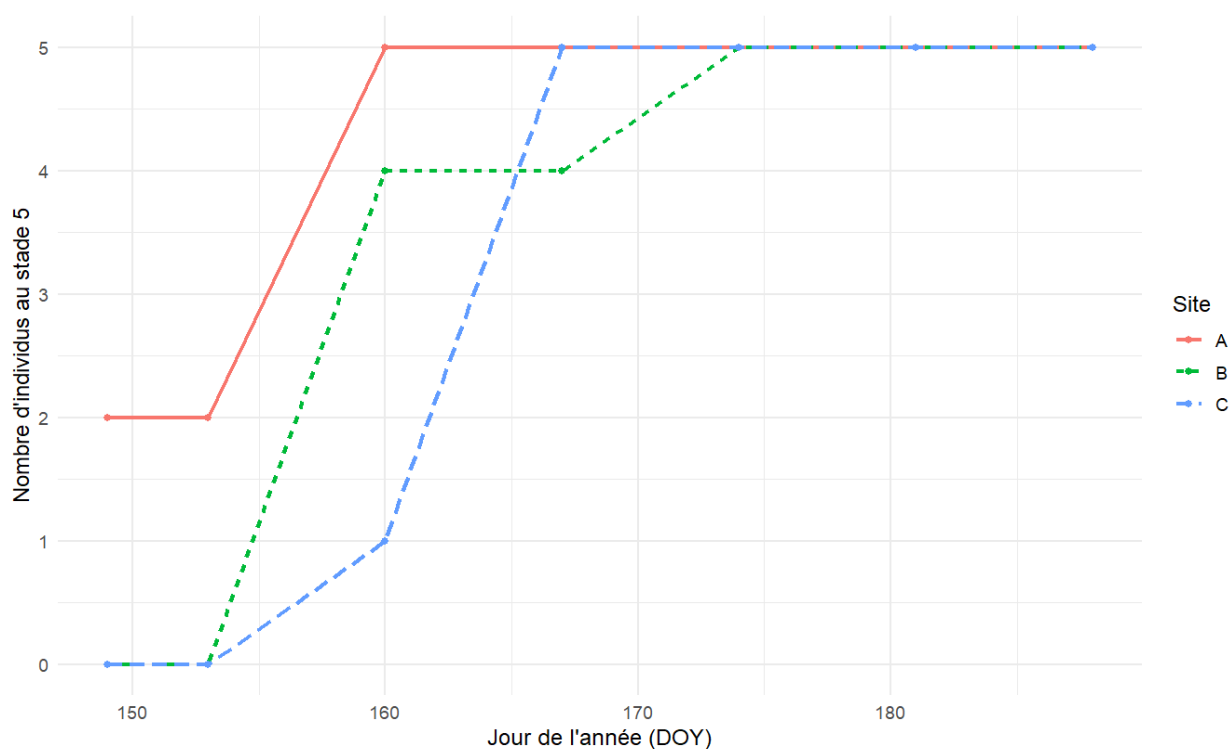


Figure 19 : Evolution du nombre de peupliers ayant développés totalement leurs feuilles (stade 5)

Lors du premier échantillonnage, deux arbres du site A avaient déjà des feuilles développées (Figure 19). Au jour 160, tous les arbres du site A avaient des feuilles, quatre pour le site B et un seul pour le site C. Finalement, un peu avant le jour 175, tous les arbres avaient des feuilles développées.

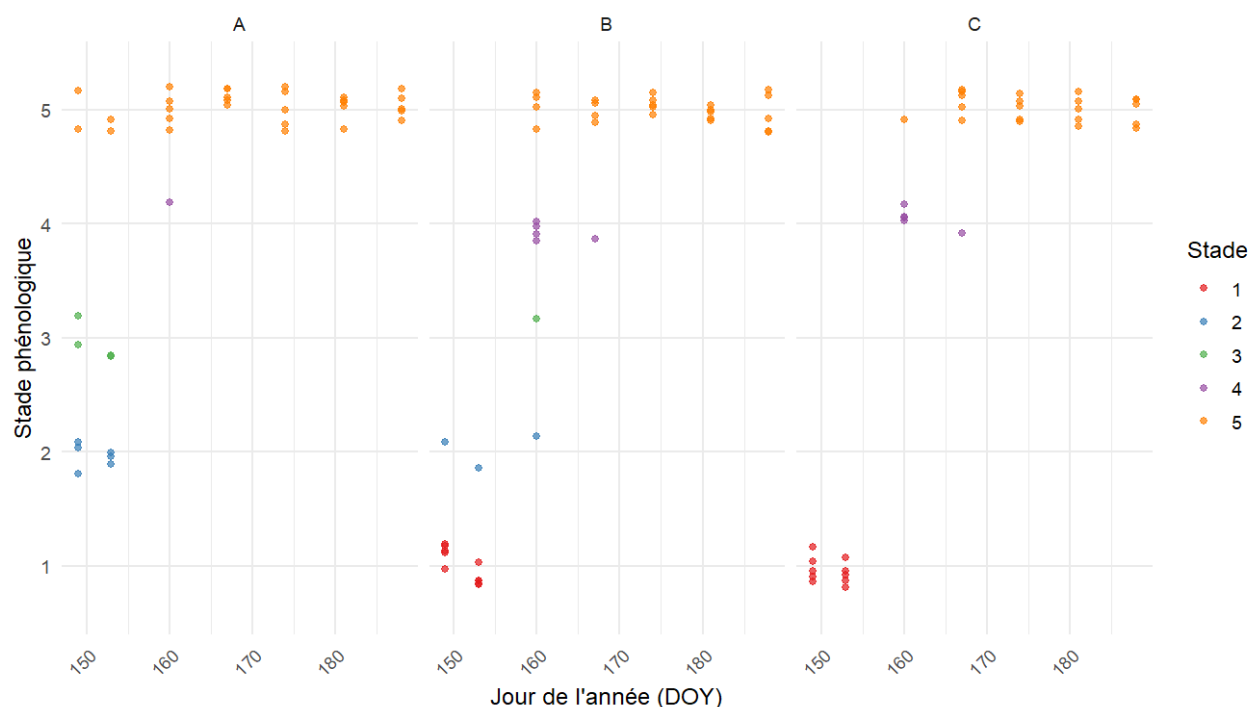


Figure 20 : Evolution des stades phénologiques des peupliers par site, 1 : bourgeons gonflés, 2 : vert des bourgeons visibles mais formant toujours une seule pointe, 3 : débourrement : les extrémités des feuilles commencent à se séparer, 4 : expansion des feuilles, 5 : feuilles développées

Si on regarde plus en détail, avec un échantillonnage hebdomadaire, nous n'avons pas vu le passage entre le stade 1 et le stade 4 pour le site C (Figure 20). Cela montre que le débourrement du site C a eu lieu très rapidement en l'espace d'une semaine tout comme celui du site A, mais qui lui était plus précoce. Celui du site B a été légèrement plus lent.

IV. Discussion

L'hypothèse que le peuplier pousse plus vite, grâce à une stratégie plus adaptative que l'épinette noire, qui a une stratégie plus conservatrice, est partiellement validée par cette étude. En effet, même si le site B présente une différence non significative et que le site A n'a pas de différence de croissance entre les deux espèces, le site C confirme cette hypothèse.

A. L'effet des sites sur la croissance

Le site A se différencie des autres sites par le fait que le dépôt surfacique est un peu plus rocheux, et que le peuplement est plus jeune. L'origine du peuplement est une Regarni de Régénération pour constituer l'équivalent d'une Plantation (PRR) datant de 2007 (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024), l'essence reboisée est l'épinette. Une hypothèse serait que le fait que le peuplement soit relativement jeune, gomme les différences de croissance entre les deux espèces. La taille des arbres est un facteur important dans la croissance en forêt boréale mixte. De plus, si la concurrence influe fortement sur la croissance du bois, l'âge du peuplement aura une plus grande importance que les changements environnementaux sur l'évolution de la composition de la forêt (Jiang et al., 2018).

Le site B présente un peuplement issu d'une plantation de 1986, dont l'essence reboisée est l'épinette noire. Il se différencie par une pente comprise entre 9-15%, soit légèrement plus prononcée que celle du site C (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024). Par ailleurs, nous avons observé de petits cernes de croissance sur les dernières années pour quelques individus aussi bien pour les épinettes que les peupliers. Ces petits cernes traduisent des difficultés de croissance au cours des années précédentes. Ainsi, la différence de croissance non significative entre les deux espèces étudiées sur ce site pourrait potentiellement s'expliquer par des conditions climatiques, pédologiques et biologiques différentes, moins propices à la croissance de ces deux espèces.

Sur le site C, le peuplier pousse plus vite que l'épinette vérifiant notre hypothèse. Ce site est issu d'une plantation de 1984 dont l'essence reboisée est l'épinette noire, il se différencie des autres sites par un drainage qualifié d'imparfait et par une pente légèrement plus douce (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2024).

Dans notre étude, les différences de croissance entre les deux espèces étudiées sont très dépendantes du site. Donc, globalement, le contraste entre les deux espèces est moyennement marqué. Cependant, une étude sur plusieurs années, avec des mesures dendrochronologiques, suggère que l'épinette noire et le peuplier faux-tremble ont des réactions contrastées, spécifiques à chacune des espèces à la fois pour des conditions météorologiques « moyennes » et à la fois lors d'événements météorologiques extrêmes (Drobyshev et al., 2013). Au contraire, un autre article scientifique suggère que le site, la productivité et la proportion des deux essences ainsi que leur position dans la canopée et l'état nutritionnel du site influence la croissance des arbres (Légaré et al., 2005).

Il semble donc que l'effet des sites sur la croissance est important. En effet, la réponse de croissance du bois, au changement climatique, varie de manière considérable d'une espèce à une autre, d'un site à l'autre, suggérant une plasticité dans la croissance des arbres pour s'adapter aux conditions environnementales locales (L. Chen et al., 2019; H. E. Cuny et al., 2015).

B. La temporalité de l'étude induit un biais

La temporalité de l'étude peut induire un biais sur les résultats. En effet, cette étude avait pour but d'analyser seulement la phénologie du printemps. La croissance annuelle n'était pas terminée lors du dernier échantillonnage, cela peut induire un biais, la fin de la saison de la croissance n'étant pas

quantifiée. De plus, en raison de la limite temporelle du stage et de la durée incompressible du travail de laboratoire, seules sept semaines de croissance ont été analysées. Dans notre étude, la zone cambiale est la partie ayant eu la plus grande largeur. Cependant, si nous avions la taille finale du cerne, la zone ayant la plus grande largeur serait la zone mature. Donc, avec une étude de l'entièreté de la saison de croissance, peut-être que des différences auraient pu être observées pour le site A, ou que les différences de croissance sur le site B seraient significatives.

Il serait intéressant d'avoir une station météorologique locale sur les sites, pour déterminer s'il y a des micro-différences de climat. De même, faire des prélèvements du sol pour voir les différences en termes de nutriments aurait caractérisé de manière plus fine les différentes placettes. Ces options n'étaient pas envisageables avec le matériel à notre disposition.

C. Les conditions phénologiques varient entre les années

La phénologie de la canopée a été plutôt tardive pour cette année 2025. Le débourrement du peuplier faux-tremble, dans notre étude, a commencé vers fin mai. Habituellement, pour le peuplier faux-tremble, le débourrement a lieu vers le 27 mai, soit un peu plus tôt que notre étude, et la fin de l'élargissement des feuilles se termine début juillet (Zhai et al., 2012). Dans l'étude de Zhai et al., de 2012, le début de la croissance du bois est fin mai, le pic de croissance est atteint le 14 juin et la fin de la production de cellule du xylème est le 16 août.

Pour l'épinette noire, le début de la xylogénèse commence entre mi-mai et mi-juin et se termine entre fin août et fin septembre, en résulte une saison de croissance qui dure entre 101 et 140 jours (Rossi et al., 2011; Zeng et al., 2022).

Ainsi, en général, le pic de croissance est atteint entre mi-juin et mi-juillet, la phénologie du printemps étant plus courte dans les forêts boréales que tempérées.

Là encore, la temporalité de l'étude peut impacter l'analyse des résultats. En effet, les données récoltées fin juillet et début août n'ont pas pu être traitées, nous n'avons pas la largeur finale du cerne, et sans doute pas le pic de croissance au moins pour certains individus. Afin de compléter cette étude, il faudrait traiter les derniers échantillons au laboratoire puis les mesurer, nous pourrions ainsi déterminer la date du pic de croissance pour notre étude.

D. Les améliorations possibles

Comme vu précédemment, les sites ont un impact sur la croissance des deux espèces étudiées. Il serait, alors, intéressant de plus caractériser les sites d'études, notamment par les facteurs édaphiques⁷ et le microclimat. Pour cela, l'installation de stations météorologiques comme dans l'étude de Chen et al. datant de 2019, ainsi que le prélèvement de sol (e.g.(Drobyshev et al., 2013)) pour des analyses de texture, d'acidité, d'organisation et de disponibilité des nutriments pourrait être envisagée.

De plus, il est important de souligner que les mesures réalisées sont susceptibles d'avoir des biais liés à l'opérateur (reconnaissance des différentes zones) et aussi à la qualité de la lame produite. Les étapes étant nombreuses, longues et délicates, entre l'échantillonnage et l'analyse des mesures, il est difficile d'avoir un nombre de lames exploitables satisfaisant qui permettrait une étude plus robuste.

⁷ « Facteurs, liés à la nature du sol, agissant sur la répartition des espèces végétales. » (Larousse)

Conclusion

Pour conclure, le peuplier faux-tremble qui a une stratégie plus acquisitrice que l'épinette noire, alors considérée plus conservatrice, pousse plus vite mais cela dépend des sites d'études.

Ainsi, dans la forêt boréale mixte, les conditions des sites varient notablement à cause du climat, de la topographie, de la pente, de l'exposition, de la texture du sol, des propriétés physiques et chimiques du sol. Ces variations de conditions des sites impactent la disponibilité des ressources pour les espèces végétales comme, par exemple, le rayonnement solaire, la température, l'humidité du sol, les nutriments (H. Y. Chen & Popadiouk, 2002).

Ce stage m'a permis de découvrir de manière plus approfondie le milieu de la recherche et de développer mes compétences d'ingénieure. J'ai ainsi revu les notions de base en secourisme. J'ai approfondi mes connaissances des manipulations en laboratoire et appris à élaborer et appliquer un protocole en laboratoire et sur le terrain. Par ailleurs, j'ai apprécié de travailler en équipe et développer mon esprit critique et mes facultés de recherche et d'analyse.

Crédits

Les figures et graphiques ont été réalisés en collaboration avec Hailey Krackovitch-Pellat et Valentina Buttò.

Bibliographie

- Adler, P. B., Salguero-Gómez, R., Compagnoni, A., Hsu, J. S., Ray-Mukherjee, J., Mbeau-Ache, C., & Franco, M. (2014). Functional traits explain variation in plant life history strategies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(2), 740-745. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315179111>
- Anyomi, K. A., Neary, B., Chen, J., & Mayor, S. J. (2022). A critical review of successional dynamics in boreal forests of North America. *Environmental Reviews*, 30(4), 563-594. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0106>
- Bergeron, Y. (2000). Species and Stand Dynamics in the Mixed Woods of Quebec's Southern Boreal Forest. *Ecology*, 81(6), 1500-1516. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1500:SASDIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1500:SASDIT]2.0.CO;2)
- Bergeron, Y., & Dubue, M. (1988). Succession in the southern part of the Canadian boreal forest. *Vegetatio*, 79(1), 51-63. <https://doi.org/10.1007/BF00044848>
- Brodribb, T. J., Pittermann, J., & Coomes, D. A. (2012). Elegance versus Speed : Examining the Competition between Conifer and Angiosperm Trees. *International Journal of Plant Sciences*, 173(6), 673-694. <https://doi.org/10.1086/666005>
- Buttò, V., Deslauriers, A., Rossi, S., Rozenberg, P., Shishov, V., & Morin, H. (2020). The role of plant hormones in tree-ring formation. *Trees*, 34(2), 315-335. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01940-4>
- Buttó, V., Millan, M., Rossi, S., & 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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.760859>
- Buttò, V., Shishov, V., Tyckov, I., Popkova, M., He, M., Rossi, S., Deslauriers, A., & Morin, H. (2020). Comparing the Cell Dynamics of Tree-Ring Formation Observed in Microcores and as Predicted by the Vaganov-Shashkin Model. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01268>

- Chen, H. Y., & Popadiouk, R. V. (2002). Dynamics of North American boreal mixedwoods. *Environmental Reviews*, 10(3), 137-166. <https://doi.org/10.1139/a02-007>
- Chen, L., Rossi, S., Deslauriers, A., & Liu, J. (2019). Contrasting strategies of xylem formation between black spruce and balsam fir in Quebec, Canada. *Tree Physiology*, 39(5), 747-754. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy151>
- Chu, X., Man, R., & Dang, Q.-L. (2023). Spring phenology, phenological response, and growing season length. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1041369>
- Chuine, I., Morin, X., & Bugmann, H. (2010). Warming, Photoperiods, and Tree Phenology. *Science*, 329(5989), 277-278. <https://doi.org/10.1126/science.329.5989.277-e>
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B. K., Frank, D., Fonti, P., Mäkinen, H., Prislan, P., Rossi, S., Del Castillo, E. M., Campelo, F., Vavřík, H., Camarero, J. J., Bryukhanova, M. V., Jyske, T., Gričar, J., Gryc, V., De Luis, M., Vieira, J., Čufar, K., Kirdyanov, A. V., ... Fournier, M. (2015). Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests. *Nature Plants*, 1, 15160. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.160>
- Cuny, H., & Rathgeber, C. (2014). Une synthèse sur le fonctionnement et la régulation des processus cellulaires de la formation du bois. *Revue Forestiere Francaise*, LXVI, 761-777. <https://doi.org/10.4267/2042/56750>
- Déjardin, A., Laurans, F., Arnaud, D., Breton, C., Pilate, G., & Leplé, J.-C. (2010). Wood formation in Angiosperms. *Comptes Rendus Biologies*, 333(4), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.01.010>
- Delpierre, N., Lireux, S., Hartig, F., Camarero, J. J., Cheaib, A., Čufar, K., Cuny, H., Deslauriers, A., Fonti, P., Gričar, J., Huang, J.-G., Krause, C., Liu, G., de Luis, M., Mäkinen, H., del Castillo, E. M., Morin, H., Nöjd, P., Oberhuber, W., ... Rathgeber, C. B. K. (2019). Chilling and forcing temperatures interact to predict the onset of wood formation in Northern Hemisphere conifers. *Global Change Biology*, 25(3), 1089-1105. <https://doi.org/10.1111/gcb.14539>

- Deslauriers, A., Rossi, S., & Liang, E. (2015). Collecting and Processing Wood Microcores for Monitoring Xylogenesis. In *Plant Microtechniques and Protocols* (p. 417-429). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19944-3_23
- D'Orangeville, L., Itter, M., Kneeshaw, D., Munger, J. W., Richardson, A. D., Dyer, J. M., Orwig, D. A., Pan, Y., & 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. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab101>
- Drobyshev, I., Gewehr, S., Berninger, F., & Bergeron, Y. (2013). Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *Journal of Ecology*, 101(1), 231-242. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12007>
- Du, S., & Yamamoto, F. (2007). An Overview of the Biology of Reaction Wood Formation. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(2), 131-143. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00427.x>
- Environnement et ressources naturelles Canada. (2025, juin 10). *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000—La Sarre*. https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=6049&dispBack=0
- FERLD. (s. d.). *Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet—Mission*. Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet. Consulté 3 juin 2025, à l'adresse <https://ferld.uqat.ca/>
- Fonti, M. V., von Arx, G., Harroue, M., Schneider, L., Nievergelt, D., Björklund, J., Hantemirov, R., Kukarskih, V., Rathgeber, C. B. K., Studer, N.-T., & Fonti, P. (2025). A protocol for high-quality sectioning for tree-ring anatomy. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1505389. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1505389>

- Forrest, J., & Miller-Rushing, A. J. (2010). Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1555), 3101-3112. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0145>
- Grime, J. P. (1977). Evidence for the Existence of Three Primary Strategies in Plants and Its Relevance to Ecological and Evolutionary Theory. *The American Naturalist*, 111(982), 1169-1194.
- Grondin, P., Brice, M.-H., Boulanger, Y., Morneau, C., Couillard, P.-L., Richard, P. J. H., Chalumeau, A., & Poirier, V. (2023). Ecological Classification in Forest Ecosystem Management : Links Between Current Practices and Future Climate Change in a Québec Case Study. In M. M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, & Y. Bergeron (Éds.), *Boreal Forests in the Face of Climate Change* (Vol. 74, p. 219-246). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_8
- Harroué, M., Cornu, E., & Rathgeber, C. (2011). *Méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons pour l'étude de l'activité cambiale et de la formation du bois*. 73, 45-62.
- Jiang, X., Huang, J.-G., Cheng, J., Dawson, A., Stadt, K. J., Comeau, P. G., & Chen, H. Y. H. (2018). Interspecific variation in growth responses to tree size, competition and climate of western Canadian boreal mixed forests. *Science of The Total Environment*, 631-632, 1070-1078. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.099>
- Johnson, D. M., McCulloh, K. A., Woodruff, D. R., & Meinzer, F. C. (2012). Hydraulic safety margins and embolism reversal in stems and leaves : Why are conifers and angiosperms so different? *Plant Science*, 195, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.06.010>
- Lachaud, S., Catesson, A.-M., & Bonnemain, J.-L. (1999). Structure and functions of the vascular cambium. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 322(8), 633-650. [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(99\)80103-6](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(99)80103-6)
- Langdon, L. M. (1920). Sectioning Hard Woody Tissues. *Botanical Gazette*, 70(1), 82-84.
- Légaré, S., Bergeron, Y., & Paré, D. (2005). Effect of aspen (*Populus tremuloides*) as a companion species on the growth of black spruce (*Picea mariana*) in the southwestern boreal forest of

- Quebec. *Forest Ecology and Management*, 208(1), 211-222.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.12.004>
- Lemire, M. (2024). *Phénologie et taux de croissance radiale des arbres à la limite septentrionale du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune*.
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2022). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. F24-06-2211.
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2024). *Cartographie du cinquième inventaire écoforestier du Québec méridional – Méthodes et données associées*. Gouvernement du Québec. <https://mffp.gouv.qc.ca/le-ministere/publications/>
- Nock, C. A., Vogt, R. J., & Beisner, B. E. (2016). Functional Traits. In *eLS* (p. 1-8). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0026282>
- Pallardy, S. G. (2010). *Physiology of Woody Plants*. Academic Press.
- Plomion, C., Leprovost, G., & Stokes, A. (2001). Wood Formation in Trees. *Plant Physiology*, 127(4), 1513-1523.
- Poulin, H. (avec Villeneuve, N., Boucher-Roy, A., & LaRue, P.). (2008). *L'aménagement durable en forêt boréale : Une réponse concrète aux défis environnementaux* (Version 1.1). Ministère des ressources naturelles et de la faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts.
- Prislan, P., del Castillo, E. M., Skoberne, G., Špenko, N., & Gričar, J. (2022). Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses. *Dendrochronologia*, 73, 125959.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125959>
- Puchi, P. F., Castagneri, D., Rossi, S., & Carrer, M. (2020). Wood anatomical traits in black spruce reveal latent water constraints on the boreal forest. *Global Change Biology*, 26(3), 1767-1777.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14906>
- Ressources naturelles Canada. (2020, décembre 8). *Glossaire forestier | Ressources naturelles Canada*. Gouvernement du Canada. <https://scf.rncan.gc.ca/termes/vue/371>

- Ressources naturelles Canada. (2024, novembre 1). *Forêt boréale*. Gouvernement du Canada.
<https://ressources-naturelles.canada.ca/forets-foresterie/amenagement-forestier-durable/foret-boreale>
- Rossi, S., Anfodillo, T., Čufar, K., Cuny, H. E., Deslauriers, A., Fonti, P., Frank, D., Gričar, J., Gruber, A., Huang, J.-G., Jyske, T., Kašpar, J., King, G., Krause, C., Liang, E., Mäkinen, H., Morin, H., Nöjd, P., Oberhuber, W., ... Treml, V. (2016). Pattern of xylem phenology in conifers of cold ecosystems at the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 22(11), 3804-3813.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13317>
- Rossi, S., Anfodillo, T., & Menardi, R. (2006). Trephor : A New Tool for Sampling Microcores from tree stems. *IAWA Journal*, 27(1), 89-97. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000139>
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., & Carraro, V. (2007). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152(1), 1-12.
<https://doi.org/10.1007/s00442-006-0625-7>
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Morin, H., Saracino, A., Motta, R., & Borghetti, M. (2006). Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 170(2), 301-310. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01660.x>
- Rossi, S., Morin, H., Deslauriers, A., & Plourde, P.-Y. (2011). Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. *Global Change Biology*, 17(1), 614-625.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02191.x>
- Schopfer, P. (2006). Biomechanics of plant growth. *American Journal of Botany*, 93(10), 1415-1425.
<https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1415>
- Silvestro, R., Deslauriers, A., Prislan, P., Rademacher, T., Rezaie, N., Richardson, A. D., Vitasse, Y., & Rossi, S. (2025). From Roots to Leaves : Tree Growth Phenology in Forest Ecosystems. *Current Forestry Reports*, 11(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00245-9>

- Sperry, J. S., Hacke, U. G., & Pittermann, J. (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal of Botany*, 93(10), 1490-1500.
<https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1490>
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2002). Heartwood Formation and Natural Durability—A Review. *Wood and Fiber Science*, 587-611.
- Traversari, S., Giovannelli, A., & Emiliani, G. (2022). Wood Formation under Changing Environment : Omics Approaches to Elucidate the Mechanisms Driving the Early-to-Latewood Transition in Conifers. *Forests*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/f13040608>
- Triviño, M., Potterf, M., Tijerín, J., Ruiz-Benito, P., Burgas, D., Eyvindson, K., Blattert, C., Mönkkönen, M., & Duflot, R. (2023). Enhancing Resilience of Boreal Forests Through Management Under Global Change : A Review. *Current Landscape Ecology Reports*, 8(3), 103-118.
<https://doi.org/10.1007/s40823-023-00088-9>
- UQAT. (s.d.). *Institut de recherche sur les forêts*. Consulté 30 mai 2025, à l'adresse <http://www.uqat.ca/uqat/departements/irf/>
- UQAT. (2025, mai 29). *L'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*. <https://www.uqat.ca>
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882-892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S., & Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2). <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Way, D. A., & Montgomery, R. A. (2015). Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 38(9), 1725-1736.
<https://doi.org/10.1111/pce.12431>
- Wiedenhoef, A. (2010). Structure and function of wood. *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material: Chapter 3. Centennial Ed. General Technical Report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S.*

Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: P. 3.1-3.18., 190, 3.1-3.18.

Wiedenhoef, A., & Miller, R. (2005). Structure and Function of Wood. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*.

Yun, J., Jeong, S.-J., Ho, C.-H., Park, C.-E., Park, H., & Kim, J. (2018). Influence of winter precipitation on spring phenology in boreal forests. *Global Change Biology*, 24(11), 5176-5187.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14414>

Zeng, Q., Khan, A., Deslauriers, A., & Rossi, S. (2022). May Temperature Drives Cambial Resumption in the Boreal Black Spruce. *Forests*, 13(12), 2168. <https://doi.org/10.3390/f13122168>

Zhai, L., Bergeron, Y., Huang, J.-G., & Berninger, F. (2012). Variation in intra-annual wood formation, and foliage and shoot development of three major Canadian boreal tree species. *American Journal of Botany*, 99(5), 827-837. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100235>

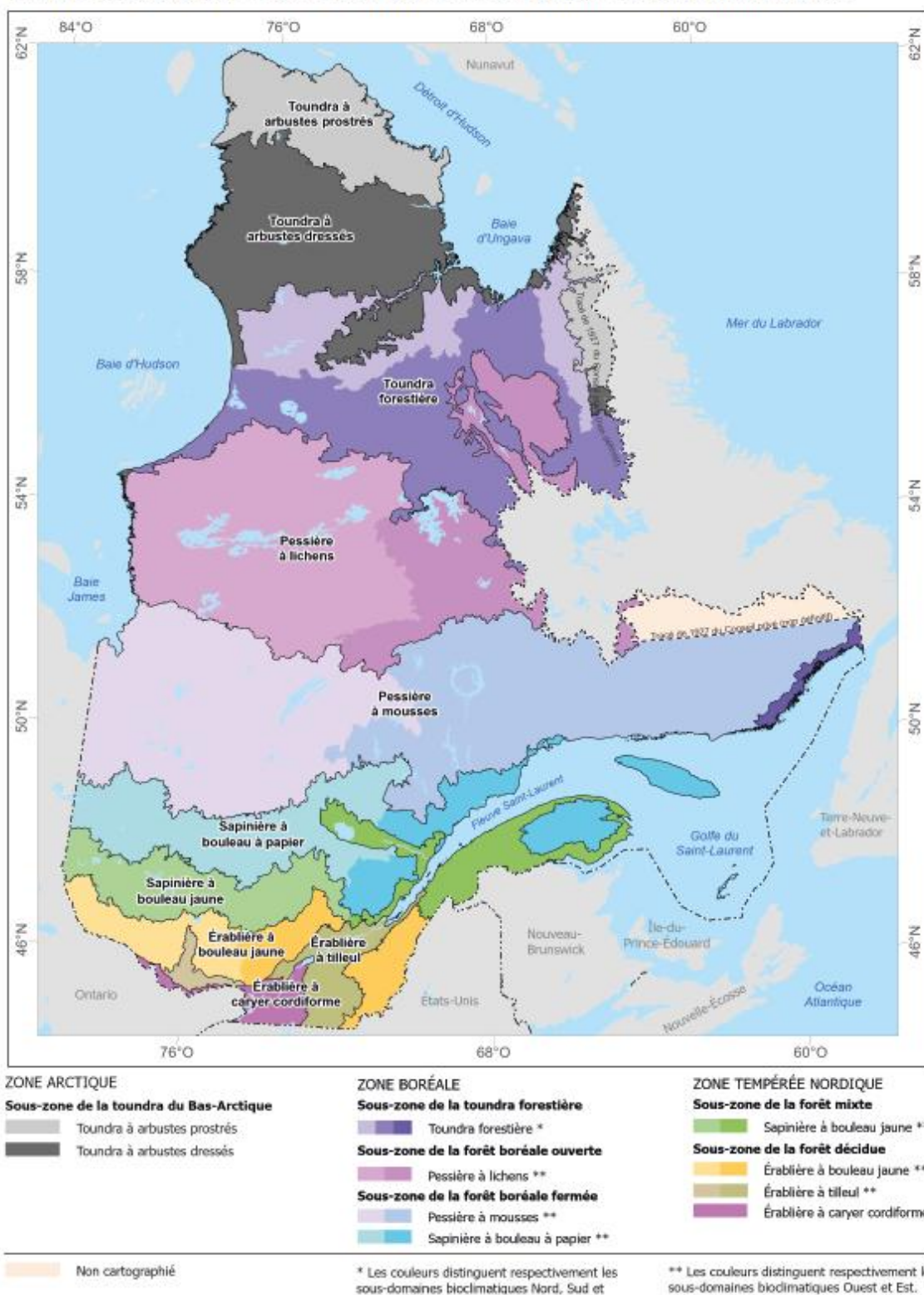
Zhang, S., Belien, E., Ren, H., Rossi, S., & Huang, J.-G. (2020). Wood anatomy of boreal species in a warming world: A review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13(2), 130.
<https://doi.org/10.3832/ifor3230-013>

Zhong, R., & Ye, Z.-H. (2015). Secondary Cell Walls: Biosynthesis, Patterned Deposition and Transcriptional Regulation. *Plant and Cell Physiology*, 56(2), 195-214.
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcu140>

Annexes

Annexe 1 : Carte des domaines bioclimatiques du Québec

CARTE DES ZONES DE VÉGÉTATION ET DES DOMAINES BIOCLIMATIQUES



Source : Gouvernement du Québec

Annexe 2 : Liste du matériel utilisé

Terrain :

- Tréphor et maillet
- Couteau
- Eppendorf comprenant une solution éthanol à 50 % et boîte à Eppendorf
- Rubalise pour marquer les individus sélectionnés
- Marqueur
- Tarière de Pressler
- Mètre ruban pour la circonférence
- Hypsomètre

Laboratoire :

1. Orientation et nommage des échantillons

- Crayon
- Microcassette
- Pince fine
- Loupe binoculaire ou loupe simple
- Lame de rasoir

2. Déshydratation des échantillons, infiltration

- Bécher
- Gant
- Forme circulaire trouée en aluminium
- Epprouvette graduée
- Ethanol 95 %
- Citrosolv ou Histoclear
- Parafilm
- Paraffine
- Hotte aspirante
- Agitateur magnétique
- Barreau aimanté
- Bain marie

3. Enrobage des microcarottes

- Enrobeuse
- Moule en acier inox
- Cryosole
- Paraffine
- Pince fine
- Cutter ou lame de microtome

4. Dégrossissage

- Microtome
- Lame de microtome
- Bécher
- Eau distillée
- Pinceau

5. Coupe

- Microtome
- Lame de microtome neuve
- Pinceau
- Aiguille
- Microscope
- Pince
- Bain chauffant
- Lames minces
- Eau albuminée
- Boîte pour lame
- Papier absorbant
- Etuve

6. Coloration

- Récipient pour bains
- Panier
- Safeclear
- Ethanol 95%
- Safranine-AstraBlue ou Acétate de violet de crésyle
- Eau distillée
- Papier absorbant
- Gant
- Hotte aspirante
- Eukitt
- Lamelle
- Pipette
- Bidon de récupération

Annexe 3 : Recette pour préparer l'eau albuminée

Peser 0,5 g d'albumine déshydratée et 0,05 g de sel de cuisine (NaCl). Ajouter 10 ml d'eau distillée et 10 ml de glycérol, bien mélanger. Si besoin utiliser un agitateur magnétique. Conserver la solution au frigidaire.

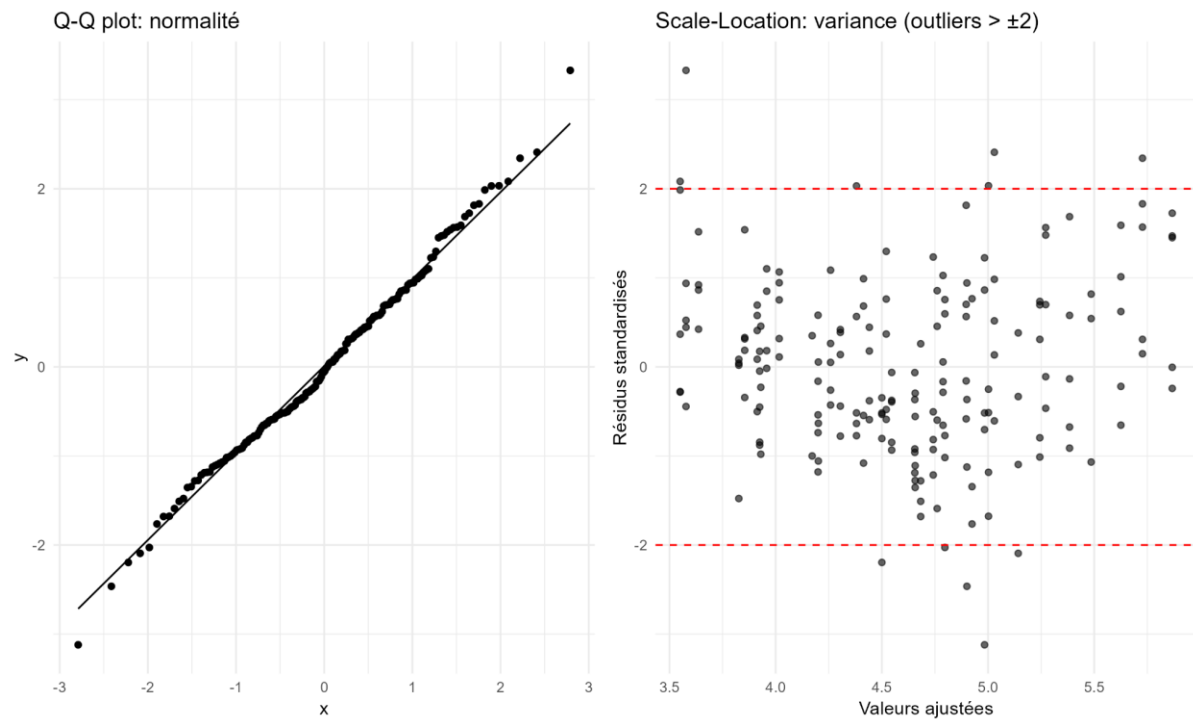
Source : Valentina Buttò

Annexe 4 : Recette pour préparer le colorant safranine alcian blue

Peser 0.35g de safranine et le dissoudre dans 35ml d'alcool à 50% dans un flacon. Peser 0,65 g d'alcian blue et le dissoudre dans 65 ml d'eau distillée dans un autre flacon. Ajouter les deux solutions dans le pot prévu à cet effet et bien mélanger.

Source : Valentina Buttò

Annexe 5 : Q-Q plot et résidus standards



Béatrice
Gouraud
2024-2025



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Comparaison de la croissance du peuplier faux-tremble et de l'épinette noire, deux espèces boréales aux stratégies écologiques différentes : recherche au sein de la FERLD dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau à papier au Québec

Résumé : Etude comparée des stratégies du peuplier faux-tremble et de l'épinette noire via la formation de leur bois durant la croissance du printemps, sur trois placettes situées au sein de la FERLD, au Québec, Canada. Après une présentation de la forêt boréale et des espèces qui la composent, ce rapport s'attache à l'analyse de la croissance du bois d'individus des espèces étudiées sur plusieurs semaines. Le peuplier faux-tremble qui a une stratégie plus acquisitrice que l'épinette noire devrait croître plus vite que l'épinette noire. Cependant, cette étude montre que cela est fortement dépendant du site.

Abstract : Comparative study of the strategies of trembling aspen and black spruce through their wood formation during spring growth, on three plots located within the FERLD, in Quebec, Canada. After a presentation of the boreal forest and its constituent species, this report focuses on the analysis of the wood growth of individuals of the species studied over several weeks. Aspen, which has a more acquisitive strategy than black spruce, should grow faster than black spruce. However, this study shows that this is highly site dependent.

Mots Clés : croissance, anatomie du bois, *Picea mariana*, *Epinette noire*, *Populus tremuloides*, *Peuplier faux-tremble*, forêt boréale, Québec, stratégies écologiques

Tuteur entreprise :
Valentina Buttò
Professeure chercheuse

Tuteur académique :
Séraphine Grellier

Université du Québec en Abitibi-
Témiscamingue (UQAT)
Station de recherche de la FERLD, 488 ch.
du Balbuzard J0Z 3G0 Rapide-Danseur

