

Enrichissement de chênes rouges et de pins blancs : observations après plus de 20 ans



Rapport présenté au

CLD du Haut-Saint-François
Programme d'aménagement durable des forêts (PADF)

Par

Benoit Truax, Ph. D.

Fiducie de recherche sur la forêt des Cantons-de-l'Est
et

Marie-Josée Martel, ing. f., M. Sc.

Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie

Avril 2024

Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie



37 rue Craig Nord
Cookshire-Eaton (Québec) J0B 1M0

Téléphone : (819) 875-1007

Courriel : amfe@abacom.com

<https://agenceestrie.qc.ca/>

Fiducie de recherche sur la forêt des Cantons-de-l'Est Eastern Townships Forest Research Trust

1 rue Principale
Saint-Benoît-du-Lac (Québec) J0B 2M0

Téléphone : (819) 821-8377

Courriel : btruax@frfce.qc.ca

www.frfce.qc.ca



Photo sur la page couverture :

Chênes rouges plantés par enrichissement à la station **Lec**, municipalité de Stanstead en Estrie.

Photo sur cette page :

Chênes rouges plantés par enrichissement à la station **Gre**, municipalité de Racine en Estrie.

Crédit photo, Marie-Josée Martel, AMFE, août 2023.

Référence à citer :

Truax, B., et Martel, M.-J. (2024). Enrichissement de chênes rouges et de pins blancs : observations après plus de 20 ans. Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie. Cookshire-Eaton (QC), 46 p.

Remerciements

Ce projet d'acquisition de connaissances a été rendu possible grâce à la contribution de plusieurs organismes et individus. Nous sommes reconnaissants envers le CLD du Haut-St-François à titre de délégataire de la Table des MRC de l'Estrie pour la gestion du Programme d'aménagement durable des forêts et le ministère des Ressources naturelles et des Forêts pour l'octroi du financement. Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble des conseillers forestiers de l'Estrie et des propriétaires forestiers privés qui ont facilité la sélection initiale des stations et le mesurage subséquent des arbres. Nous tenons à remercier sincèrement Messieurs Guyôm Cheval, ing. f., de l'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie, Normand Bérubé, forestier retraité, et M. Hugues Meyers, agr., pour leur aide précieuse lors du mesurage des stations au cours de l'été 2023. Enfin, nous désirons remercier Madame France Lambert, M. Sc., de la Fiducie de recherche sur la forêt des Cantons-de-l'Est et M. Charles Truax (Bacc. Mathématiques) pour la saisie, le traitement et l'analyse statistique de l'ensemble des données de même que le montage graphique des figures et des tableaux.

Les partenaires de l'entente de délégation de gestion du Programme d'aménagement durable des forêts du ministère des Ressources naturelles et des Forêts pour la période 2021-2024.



Résumé

Ce projet d'acquisition de connaissances visait à établir l'état général des chênes rouges et pins blancs (survie et croissance) et de déterminer les conditions de réussite ou d'échec de l'enrichissement de peuplements dégradés après plus de vingt ans en Estrie. L'enrichissement par reboisement de forêts dégradées est considéré comme une méthode alternative à la plantation traditionnelle en champs ou en milieu forestier. Il existe peu d'études à long terme ayant validé cette approche au Québec.

Nous avons sélectionné dans un premier temps en 2007, 40 placettes (provenant de 20 stations préalablement visitées et sélectionnées en 2006), où l'enrichissement avec du chêne rouge et/ou du pin blanc avait été effectué depuis moins de 10 ans. Pour ce faire, nous avons utilisé les prescriptions sylvicoles (incluant les rapports d'exécution) archivées à l'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie (AMFE), afin de s'assurer de la date de plantation et du type de plant utilisé. Chaque station a été échantillonnée à l'aide de deux quadrats ayant chacun 20 m x 20 m (400 m² ou 0,04 ha) et centrés sur les groupes d'arbres reboisés par enrichissement les plus visibles et bien répartis. À l'intérieur de chaque surface de 400 m², chaque tige d'arbre a été comptée et mesurée par essence. Les strates arbustives, herbacées et muscinales étaient échantillonnées de façon générale dans chaque quadrat en estimant le pourcentage de recouvrement total pour chacune des strates. L'âge du peuplement forestier où l'enrichissement a été effectué a été évalué par carottage. Les facteurs écologiques de chaque quadrat étaient notés (pourcentage et orientation de la pente, position et forme de la pente, classe de drainage, pierrosité en surface, situation topographique). L'altitude de chacun des quadrats a été notée à l'aide du GPS. La position géographique du centre de chaque quadrat était également enregistrée (GPS). Un échantillon de sol (composite) a été prélevé à l'intérieur de chacun des quadrats afin d'en caractériser ses propriétés. Finalement, après avoir subdivisé adéquatement le quadrat à l'aide de rubans à mesurer, l'ensemble des arbres reboisés étaient identifiés et mesurés en termes de la hauteur totale, de diamètre à la base et également de la présence et de l'intensité du broutage par le cerf de Virginie. En 2023, après seize années, un deuxième échantillonnage a été effectué pour l'ensemble des sites mesurés en 2007 en utilisant le même protocole terrain, à l'exception de certaines mesures (pourcentage de recouvrement des strates herbacées et muscinales entre autres).

En 2023, l'analyse des données montre que près de la moitié des chênes rouges sont morts depuis 2007 (taux de survie = 54 %). En combinant le taux de survie et la hauteur moyenne des chênes, il a été possible de déterminer que près de la moitié des stations (8/17) présentaient les conditions idéales de croissance, que trois stations avaient des valeurs moyennes et finalement, six stations étaient considérées comme médiocres. D'autre part, le chêne rouge répond essentiellement aux mêmes variables qu'en 2007, soit celles statistiquement significatives en lien avec les variations de croissance de cette espèce, à l'exception du broutement par le cerf de Virginie qui n'a pas été analysé, étant donné la taille imposante de la majorité des chênes mesurés. En 2023, l'âge des peuplements ($R^2=0,38$; $p<0,001$) et secondairement la hauteur ($R^2=0,20$; $p<0,032$) sont les facteurs à considérer. De plus, les modèles de régression entre la hauteur des chênes rouges en 2023 et les variables biotiques des peuplements (surface terrière et la densité des gaules en 2007) sont également hautement significatifs. La croissance rapide du chêne rouge est directement liée à l'âge du peuplement (hauteur) de la station à reboiser et également à la surface terrière résiduelle du peuplement. Plus un peuplement présente une faible hauteur (station jeune) et une faible surface terrière au moment de la plantation, plus la croissance des chênes est favorisée. De plus, la densité des gaules est corrélée positivement avec la croissance du chêne rouge, où une forte densité a probablement diminué le broutement par le cerf de Virginie au moment de la plantation. Ceci confirme également que le potentiel théorique de reboisement du chêne rouge est toujours élevé en Estrie, mais que l'augmentation du cheptel de cerf de Virginie de même qu'un mauvais choix de la station à enrichir par l'aménagiste, lié à une ouverture du couvert insuffisante au moment de la plantation pourrait expliquer l'insuccès de l'établissement pour cette essence de valeur. Le choix de la station est critique, car il explique presque à lui seul le succès ou l'échec du reboisement.

En 2023, l'analyse des données montre que près du deux tiers des pins blancs sont morts (taux de survie = 35 %). Les hauteurs moyennes mesurées variaient de 11,6 m à 3,2 m pour la meilleure et la pire station échantillonnée. Le cas du pin blanc est intéressant, car aucune des variables biotiques des peuplements n'explique les variations de croissance pour cette essence en 2023. Nos résultats montrent que le pin blanc présente toujours un potentiel de reboisement par enrichissement en Estrie. Toutefois, nous devons demeurer prudents quant à une conclusion définitive étant donné le plus faible nombre de parcelles mesurées pour cette espèce en 2023. Néanmoins, cette espèce ubiquiste peut coloniser des stations qui seraient défavorables au chêne, principalement en termes de type de végétation arborescente (résineuse ou feuillu) et également au niveau de la richesse édaphique et du drainage. Le fait que le broutement par le cerf de Virginie affecte peu le pin blanc favorise encore plus cette espèce résineuse de valeur, étant donné les fortes densités de chevreuil retrouvées en Estrie.

Un des objectifs de cette étude était de pouvoir émettre des pistes de solutions pour améliorer l'enrichissement comme traitement sylvicole novateur en Estrie, particulièrement en lien avec les changements climatiques qui affectent déjà l'écosystème forestier du sud du Québec. À la lumière des résultats de cette étude, il est recommandé de diminuer la densité de plantation des chênes et pins et viser à 500 plants à l'hectare et de maximiser systématiquement la protection des chênes à l'aide de manchons forestiers, afin de contrer l'effet néfaste du broutement par le cerf de Virginie. Nous recommandons le manchon de type K développé par feu M. Peter Kilburn qui a abondamment testé cette méthode avec succès en Estrie. En utilisant les manchons, les aménagistes peuvent cibler un plus grand spectre de peuplements en termes d'âge et de composition. Il faut également porter une attention particulière à l'envahissement du sous-bois des forêts de l'Estrie par le nerprun bourdaine avant de planifier une plantation par enrichissement et prévoir de réduire sa présence avant et également après la mise en terre des plants. En combinant une coupe partielle forte ou en créant une trouée dans un peuplement naturel ou en plantation avec la protection systématique des feuillus, les aménagistes maximisent alors les chances de succès, car tout se joue au cours des premières années après la mise en terre. Il ne faut pas exclure également un dégagement de puits de lumière et/ou une éclaircie subséquente, afin de vraiment favoriser la croissance des plants, idéalement avec les feuillus et exceptionnellement avec les résineux (pour éviter de détruire la tige apicale des conifères). Finalement, bien que le chêne rouge et le pin blanc soient au cœur d'une stratégie possible de restauration des peuplements forestiers en Estrie, il faut envisager dès maintenant l'utilisation d'autres espèces d'arbres de valeur dont, les chênes blancs, les caryers, les noyers, le tilleul, l'érable à sucre, le micocoulier, le châtaignier d'Amérique, le cerisier tardif, la pruche et l'épinette rouge, sans limitations d'ajouts d'autres essences potentielles. Il faudra également considérer l'utilisation d'hybrides tolérants ou de lignées indigènes résistantes de ces essences, afin de favoriser la résilience des peuplements forestiers qui subiront de grands changements d'ici la fin du siècle. La restauration de l'écosystème forestier dégradé, en utilisant entre autres l'enrichissement comme mode de plantation, deviendra au fil des années un passage obligé compte tenu de la progression fulgurante des insectes et pathogènes exotiques qui affectent déjà nos forêts et continueront de le faire dans le futur.

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Remerciements | iii |
| Résumé..... | iv |
| Introduction..... | 8 |
| Objectifs en relation avec le plan d’actions régionales..... | 10 |
| OBJECTIFS SPÉCIFIQUES | 10 |
| Méthodes | 11 |
| DESCRIPTION DE LA ZONE D’ÉTUDE, SÉLECTION DES SITES ET CHRONOLOGIE DU SUIVI DEPUIS 20 ANS | 11 |
| ÉCHANTILLONNAGE EN 2023 DES STATIONS REBOISÉES PAR ENRICHISSEMENT | 14 |
| ÉCHANTILLONNAGE EN 2023 DES ARBRES PLANTÉS PAR ENRICHISSEMENT | 15 |
| ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSE DES SOLS | 15 |
| ANALYSES STATISTIQUES | 16 |
| Résultats | 17 |
| CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES STATIONS..... | 17 |
| SURVIE, HAUTEUR ET DENSITÉ (TIGES/HA) DES CHÊNES ROUGES REBOISÉS PAR ENRICHISSEMENT | 18 |
| MATRICES DES CORRÉLATIONS (PEARSON) ET MODÈLES DE RÉGRESSION POUR LE CHÊNE ROUGE | 19 |
| SURVIE, HAUTEUR ET DENSITÉ (TIGES/HA) DES PINS BLANCS REBOISÉS PAR ENRICHISSEMENT | 23 |
| MATRICES DES CORRÉLATIONS (PEARSON) ET MODÈLES DE RÉGRESSION POUR LE PIN BLANC | 24 |
| Discussion | 27 |
| LE CHÊNE ROUGE | 27 |
| LE PIN BLANC..... | 30 |
| Conclusion et implications pour l’aménagement des forêts dégradées de l’Estrie..... | 32 |
| Références..... | 34 |
| ANNEXE | 37 |

Liste des tableaux

| | | |
|------------------|--|----|
| Tableau 1 | Caractéristiques générales des stations | 17 |
| Tableau 2 | Survie (%), hauteur (m) et densité (tiges/ha) des chênes rouges..... | 18 |
| Tableau 3 | Modèles de régression entre les variables biotiques des peuplements (stations) et la hauteur (m) des chênes rouges (avec ou sans rejets) reboisés par enrichissement | 22 |
| Tableau 4 | Survie (%), hauteur (m) et densité (tiges/ha) des pins blancs | 23 |
| Tableau 5 | Modèles de régression entre la hauteur (m) des pins blancs reboisés par enrichissement et les variables biotiques des peuplements (stations)..... | 26 |

Liste des figures

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure 1 | Localisation des stations du dispositif de recherche en Estrie en 2023 | 13 |
| Figure 2 | Matrice des corrélations (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges (avec rejets) mesurés en 2023. | 20 |
| Figure 3 | Matrice des corrélations (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges (sans rejets) mesurés en 2023. | 21 |
| Figure 4 | Relations entre la hauteur des chênes rouges reboisés et l'âge des peuplements (stations) en 2023. | 22 |
| Figure 5 | Matrice de corrélation (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des pins blancs mesurés en 2023. | 25 |

Introduction

L'enrichissement est un traitement sylvicole visant l'introduction ou l'augmentation du nombre de tiges d'essences nobles – feuillus et pin blanc -, mais également des résineux plus difficile à régénérer naturellement – épinette rouge et thuya - dans un peuplement, afin d'améliorer la qualité de la régénération présente et sa composition en espèces désirées. Les plants reboisés sous un couvert forestier partiellement ouvert ou en trouées croissent ainsi dans une ambiance forestière. Ce système de reboisement et de restauration des peuplements forestiers a été largement utilisé avec le chêne rouge aux États-Unis (Johnson, 1984; Crow, 1988; Hannah, 1991; Gribko et al., 2002; Dey et al., 2008). L'enrichissement est un traitement sylvicole inclus dans la gamme des travaux de mise en valeur de la forêt privée. À titre de référence, voici un extrait du Rapport de la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise (commission Coulombe, décembre 2004) :

« On doit comprendre que, partout dans le monde, la dégradation généralisée des écosystèmes forestiers entraîne actuellement l'émergence de nouvelles approches sylvicoles. Dans la majorité des pays, les forêts dégradées par les activités humaines issues de coupes abusives font désormais l'objet d'une attention particulière. Par exemple, une technique d'enrichissement sous couvert est désormais proposée pour accélérer le retour des espèces associées aux forêts matures et à fort potentiel économique, et ce, en forêt tropicale humide, en forêt feuillue tempérée et même en forêt boréale. Ces techniques, de plus en plus adoptées avec succès ailleurs, ne sont qu'au stade expérimental au Québec, essentiellement dans la forêt privée du sud-ouest, grâce au soutien de quelques agences forestières progressistes. »

L'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie (AMFE) fait partie de ce groupe qui a expérimenté cette nouvelle approche sylvicole. Suite aux travaux de recherche de Truax et al., (1994, 1996, 2000), l'Agence Estrie a établi de nouvelles modalités techniques pour ce traitement sylvicole. Toutefois, cette approche est toujours demeurée marginale, soit 1 % des plants reboisés entre 1999 et 2022. Le nombre de plants de feuillus nobles et de pins blancs reboisé a connu son apogée au cours des cinq premières années de la décennie 2000. Depuis, la quantité d'essences feuillues n'a cessé de diminuer au profit des résineux, principalement l'épinette blanche. Le reboisement de feuillus en plantation ou en enrichissement a toujours représenté un défi en termes de coûts et de soins culturaux pour les propriétaires de boisés. L'obligation de protéger les

plants pour contrer la déprédation des cerfs de Virginie, l'exigence du suivi annuel des protecteurs et plus récemment, l'absence de financement dédié à cette activité représentent des freins pour l'introduction des feuillus nobles en plus grande quantité en forêt privée. Les essences résineuses sont par conséquent favorisées pour le peu d'hectares d'enrichissement réalisé en région.

L'enrichissement étant une approche sylvicole récente au début du millénaire, le contexte se prêtait bien pour documenter l'état et la réaction des plants après quelques années de croissance en 2007. Vingt ans plus tard, la plantation sous couvert forestier s'inscrit toujours comme un traitement novateur pour adapter les peuplements forestiers aux effets des changements climatiques. L'enrichissement est publicisé par de nombreux chercheurs, très souvent dans un cadre théorique « *conceptual framework* », pour mettre en œuvre la migration assistée des essences, la plantation multiespèces ou l'amélioration de la diversité fonctionnelle et la résilience des peuplements. Toutefois, les travaux publiés en lien avec l'enrichissement réel d'essences nobles, intégrant des données à long terme, sont actuellement rares au Québec et ailleurs dans le monde dans le domaine de l'adaptation aux changements climatiques et de la restauration des forêts (Povak, et al., 2008; Truax et al., 2015; Olson et al., 2018; Quang et al., 2020; Alamenciak et al., 2023). L'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie et la Fiducie de recherche sur la forêt des Cantons-de-l'Est ont saisi l'opportunité exceptionnelle de réaliser un suivi de sites enrichis âgés de plus de 20 ans, dont les résultats alimenteront sans contredit les réflexions sur les conditions de réussite de cette approche sylvicole dans le contexte des changements climatiques et de résilience des écosystèmes forestiers.

Objectifs en relation avec le plan d'actions régionales

- Valoriser l'intégration des enjeux de biodiversité dans la mise en valeur des milieux forestiers.
- Soutenir l'acquisition et le transfert de connaissances sur le milieu forestier.
- Optimiser l'aménagement forestier dans le contexte des changements climatiques.

Objectifs spécifiques

- 1) Établir l'état général des chênes rouges et pins blancs reboisés par enrichissement, leur croissance et le taux de survie après plus de 20 ans.
- 2) Déterminer les conditions de réussite de l'enrichissement pour la restauration de peuplements forestiers.
- 3) Émettre des pistes de solutions pour améliorer le traitement sylvicole qu'est l'enrichissement.

Méthodes

Description de la zone d'étude, sélection des sites et chronologie du suivi depuis 20 ans

La phase initiale du présent projet a été réalisée au cours de l'été 2006. Plus de 30 propriétaires forestiers furent contactés par M. Normand Bérubé, alors ingénieur forestier et coordonnateur à la vérification opérationnelle à l'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie. Les stations furent sélectionnées à partir des rapports d'exécution des différents conseillers forestiers accrédités, pour essentiellement couvrir le gradient de l'Estrie et être représentatives de l'ensemble des travaux d'enrichissement pour cette région. Ce choix ne tenait pas compte du succès ou de l'échec de ce type de reboisement, mais visait à obtenir de façon impartiale, le plus grand nombre possible de stations à échantillonner.

Suite à ce choix initial, les stations furent visitées (août - octobre 2006). Ces visites de reconnaissance ont permis d'évaluer la variabilité dans la façon pratique dont a été effectué l'enrichissement par les différents conseillers forestiers de l'Estrie; plus particulièrement, les traitements préparatoires d'ouverture du couvert forestier. Il a également été possible de tester de façon sommaire, la manière la plus optimale d'échantillonner ces terrains en vue de la prise de données de 2007, en fonction de certains critères (sols, végétation, survie, broutage, hauteur et diamètre des semis reboisés, etc.) et d'intégrer ces observations au niveau de l'échantillonnage. La prise de données sur le terrain s'est déroulée à l'été 2007. Les stations visitées étaient au nombre de 20 et étaient localisées dans différentes MRC de l'Estrie. Chaque station a été échantillonnée à l'aide de deux quadrats de 400 m² pour un total de 40 placettes-échantillons. Cette étape a été réalisée par le personnel de l'Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie et de la Fiducie de recherche sur la forêt des Cantons-de-l'Est.

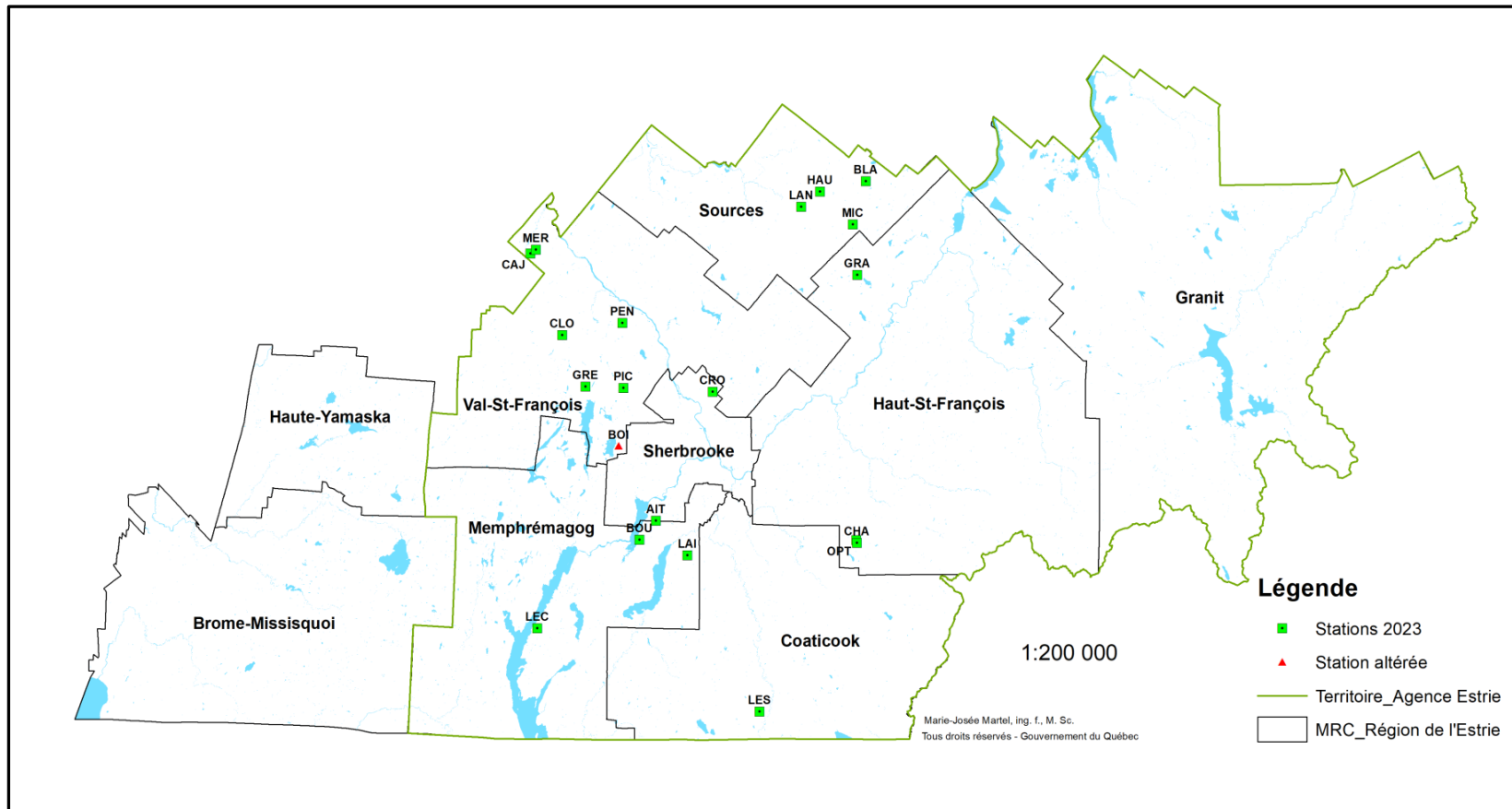
Les stations retenues pour l'échantillonnage dans le cadre de la phase II en 2007 se répartissaient de la façon suivante :

- MRC de Coaticook 1 station
- MRC du Haut-St-François 3 stations
- MRC de Memphrémagog 3 stations
- MRC des Sources 4 stations
- MRC du Val-St-François 7 stations
- Ville de Sherbrooke 2 stations

En 2008, un rapport détaillé a été produit suite à l'analyse des données de l'échantillonnage de l'été 2007 et est disponible via le site web de l'AMFE¹. Il est important de noter que suite aux vérifications initiales en vue de l'échantillonnage de l'été 2023, une station de la MRC du Val-St-François a été retirée du dispositif puisqu'un ensemble résidentiel a fortement altéré les deux blocs de cette station, portant ainsi à 19 (38 placettes-échantillons) le nombre total de stations pour le présent projet.

¹ www.agenceestrie.qc.ca/Documents_PDF/Rapport-Enrichissement%202007-2008.pdf

Figure 1 Localisation des stations du dispositif de recherche en Estrie en 2023



Échantillonnage en 2023 des stations reboisées par enrichissement

En 2023, une attention particulière a été portée afin de retrouver le centre (géoréférencé) datant de 2007 de chacune des parcelles (2 blocs/station) de l'ensemble des stations. Nous avons ainsi été en mesure de retrouver 66 % de l'ensemble des blocs des stations ayant un centre bien identifié. Dans certains cas, le piquet de métal avait carrément été enlevé, mais en général nous retrouvions assez facilement nos repères de 2007 sur le terrain (indications précises sur les feuilles de terrain de 2007). Il faut noter qu'un biais expérimental est probable puisque n'ayant pas un centre exact, ou légèrement décalé pour certains blocs, il est possible que les mesures des peuplements diffèrent également de celles de 2007. De plus, les chênes et pins n'étaient pas formellement identifiés avec une position précise dans l'espace pour chaque bloc en 2007. Toutefois, nous estimons que notre population statistique d'arbres reboisés par enrichissement demeure tout de même valable malgré ce petit biais méthodologique. De la même manière qu'en 2007, chaque station a été échantillonnée à l'aide de deux quadrats ayant chacun 20 m x 20 m (400 m² ou 0,04 ha) et centrés sur les groupes d'arbres reboisés par enrichissement les plus visibles et bien répartis. Cette façon de faire permettait de tenir compte de la variabilité de l'ensemble d'une station donnée et augmentait sensiblement la précision de l'analyse statistique des données. À l'intérieur de chaque surface de 400 m² (délimitée à l'aide de rubans à mesurer), chaque tige d'arbre a été comptée et mesurée par essence. Les arbres de dimension commerciale (diamètre à hauteur de poitrine (DHP) > 10 cm) et les gaules (DHP : 1 à 10 cm) ont été mesurés en classes de 5 cm de diamètre (entre 1-5 cm, 5-10 cm, etc.). De plus, la régénération arborescente (semis naturels) a également été comptée; c'est-à-dire les semis d'environ 1 m de haut et de DHP inférieur à 1 cm.

En 2023, les strates arbustives, herbacées et muscinales n'ont pas été échantillonnées de façon générale dans chaque quadrat en estimant le pourcentage de recouvrement total pour chacune des strates. Nous avons en priorité noté le pourcentage de recouvrement du nerprun bourdaine et secondairement, de certaines espèces indicatrices ou très abondantes.

En 2023, l'âge du peuplement forestier, où l'enrichissement a été effectué, n'a pas été évalué à nouveau puisque nous avons déjà cette information lors de l'échantillonnage de 2007. Pour fin d'analyse, il a été ajouté 16 années à l'ensemble des blocs et stations, ce qui représente le temps écoulé depuis le premier échantillonnage. Toutefois, la hauteur du peuplement a été mesurée en choisissant deux arbres d'espèces dominantes et représentatives pour chaque bloc

de l'ensemble des stations. Finalement, les facteurs écologiques de chaque quadrat n'ont pas été mesurés à nouveau en 2023 (pourcentage et orientation de la pente, position et forme de la pente, classe de drainage, pierrosité en surface, situation topographique), de même que les données de positionnement géographiques. L'altitude de chacun des quadrats a été notée à l'aide du GPS.

Échantillonnage en 2023 des arbres plantés par enrichissement

Une fois le centre du bloc bien identifié, celui-ci était dans un premier temps délimité en son pourtour, afin d'obtenir un quadrat de 20 m x 20 m. Après avoir subdivisé adéquatement l'intérieur du quadrat à l'aide de rubans à mesurer, l'ensemble des arbres reboisés étaient identifiés à l'aide de rubans marqueurs et mesurés en termes de hauteur totale à l'aide d'une perche télescopique (10 m maximum), de diamètre à la base, du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et également de la présence et de l'intensité du broutage par le cerf de Virginie, principalement pour les arbres de petites dimensions. Les chênes rouges de très fortes dimensions, qui excédaient la limite de mesure de la perche, ont été estimés à l'aide d'un clinomètre, afin de développer une régression allométrique combinant le DHP et la hauteur, et ainsi estimer plus précisément ces arbres.

Bien que cette étude eût comme objectif principal le suivi de chênes rouges, nous avons tenu à mesurer le pin blanc, puisque cette essence était souvent reboisée en même temps que le chêne par les conseillers forestiers. Toutefois, le nombre de stations représentées pour cette espèce est moindre et sera traité à part.

Échantillonnage et analyse des sols

L'échantillonnage des sols n'a pas été effectué lors du suivi 2023 pour l'ensemble des stations. Cette activité a déjà été effectuée en 2007 et il n'a pas été jugé valable de répéter ce suivi, puisque les principaux résultats ont déjà été publiés dans le rapport de 2008.

Analyses statistiques

Dans un premier temps, il a été décidé de séparer les données du chêne rouge en deux groupes, soit tous les arbres mesurés incluant les rejets et ceux de faibles dimensions et ensuite, tous les chênes en excluant ceux plus petits que 1,3 m de hauteur (sans rejets). Cette façon de faire a permis de cibler principalement les arbres plus développés et ayant performé après plus de 20 ans. Nous avons calculé le pourcentage de survie, la hauteur et la densité des tiges de chênes et pins en utilisant tous les arbres de l'ensemble des blocs pour une même station pour les années 2007 et 2023 respectivement. La survie a été calculée en utilisant le nombre d'arbres mesurés et vivants en 2007 comme base pour le calcul. Il a été impossible de calculer le pourcentage de survie depuis l'année de la plantation d'enrichissement.

Par la suite, nous avons effectué des corrélations de Pearson (à l'aide du module de R) avec l'ensemble des variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges et des pins blancs. Une fois ces données ramenées sous forme de matrice contenant la totalité des variables, nous avons sélectionné les variables qui présentaient les valeurs les plus élevées, permettant par la suite, la sélection finale pour l'analyse de régression. Toujours à l'aide du module de statistiques R, des régressions simples ont été effectuées pour chaque espèce reboisée. Par la suite, nous avons présenté sous forme de tableaux, l'ensemble des modèles (équations) des différents paramètres estimés (relation entre la hauteur des chênes et des pins reboisés et les variables biotiques des stations) en indiquant le nombre d'observations, l'équation, le coefficient de détermination R^2 et enfin, les valeurs de p . Finalement, afin de faciliter la représentation graphique, nous avons repris une des variables déclarées significatives de l'analyse de la régression (âge du peuplement en 2023) et représenté linéairement la relation pour le chêne rouge.

Résultats

Caractéristiques générales des stations

Les résultats indiquent que les 19 stations diffèrent beaucoup en lien avec l'âge, la hauteur et la surface terrière des peuplements autant en 2007 qu'en 2023 (Tableau 1). En effet, pour l'année 2023, les sites **Lec** et **Les** présentent des écarts considérables d'âge (26 ans vs 116 ans), de hauteur (13,8 m vs 24,5 m) et de surface terrière (0 m²/ha vs 38,48 m²/ha). Il est intéressant de noter une augmentation marquée également de la surface terrière entre les années 2007 et 2023, résultant de la croissance du peuplement pour cette période de 16 années. Enfin, le nerprun bourdaine est présent dans 8 stations et on remarque un pourcentage de recouvrement élevé pour 5 sites en 2023, ce qui diffère fortement de l'échantillonnage de la végétation de l'été 2007.

Tableau 1 Caractéristiques générales des stations

| Stations | Altitude moyenne (m) | Année de plantation | Âge station (années) | Hauteur peuplement (m) | | Surface terrière (m ² /ha) | | Nerprun* (%) |
|------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|------|---------------------------------------|-------|--------------|
| | | | | 2007 | 2023 | 2007 | 2023 | 2023 |
| Pic | 261 | 2003 | 65 | 17,5 | 20,0 | 9,65 | 19,46 | 5 |
| Clo | 256 | 1991 | 33 | 9,7 | 16,8 | 6,98 | 9,89 | 0 |
| Lec | 289 | 2000 | 26 | 4,3 | 13,8 | 0,00 | 0,00 | 0 |
| Gra | 377 | 2001 | 68 | 18,0 | 22,0 | 14,61 | 28,67 | 0 |
| Lan | 285 | 2002 | 45 | 12,0 | 12,0 | 9,92 | 0,00 | 0 |
| Hau | 302 | 2000 | 41 | 13,3 | 19,5 | 10,48 | 19,53 | 0 |
| Gre | 302 | 1999 | 58 | 12,7 | 18,5 | 15,71 | 27,77 | 0 |
| Pen | 240 | 2001 | 59 | 20,0 | 22,5 | 10,19 | 12,71 | 50 |
| Cha | 427 | 2000 | 92 | 22,3 | 22,3 | 29,79 | 31,12 | 0 |
| Bla | 412 | 2002 | 75 | 15,5 | 18,3 | 18,13 | 33,72 | 0 |
| Cro | 224 | 2004 | 51 | 13,0 | 20,0 | 13,73 | 17,64 | 22,5 |
| Mic | 267 | 2003 | 66 | 15,5 | 18,3 | 14,77 | 24,56 | 0 |
| Opt | 435 | 2003 | 52 | 17,5 | 20,3 | 9,44 | 21,30 | 0 |
| Lai | 255 | 2003 | 42 | 10,5 | 12,0 | 12,64 | 16,24 | 155 |
| Caj | 195 | 2004 | 49 | 17,3 | 20,8 | 10,17 | 18,29 | 115 |
| Ait | 214 | 2005 | 57 | 19,5 | 20,0 | 20,08 | 12,07 | 175 |
| Bou | 229 | 2005 | 43 | 14,3 | 17,3 | 11,38 | 9,75 | 52,5 |
| Les | 472 | 2004 | 116 | 24,5 | 24,5 | 40,98 | 38,48 | 0 |
| Mer | 110 | 2002 | 64 | 20,0 | 22,5 | 26,85 | 22,53 | 5 |

* Le pourcentage de recouvrement du nerprun bourdaine additionne les strates de semis et de gaulis.

Survie, hauteur et densité (tiges/ha) des chênes rouges reboisés par enrichissement

Le Tableau 2 présente en détail, pour chacune des 19 stations échantillonnées en 2023, les données moyennes de survie, de hauteur et de la densité (tiges/ha) des chênes rouges. On remarque en premier lieu, une grande disparité en lien avec le pourcentage de survie passant de 94 % pour la station **Lec** à 0 % pour les stations **Mer** et **Les**. D'autre part, on note un taux de survie moyen du chêne rouge de 54 % pour l'ensemble des stations. Donc, un peu plus de la moitié des arbres sont morts depuis le mesurage de 2007. De plus, cette disparité des taux de survie est également présente pour la hauteur moyenne des chênes (avec rejets) en 2023, allant de 16,54 m pour la station **Clo** à 0,19 m pour la station **Caj**. On remarque également un écart non négligeable pour certaines stations entre les valeurs des chênes incluant les rejets et ceux sans les rejets. On observe le même phénomène au niveau de la densité des tiges/ha.

Tableau 2 Survie (%), hauteur (m) et densité (tiges/ha) des chênes rouges

| Stations | Survie (%) | Hauteur avec rejets (m) | | Hauteur sans rejets (m) | | Densité avec rejets (tiges/ha) | | Densité sans rejets (tiges/ha) |
|------------|------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|
| | 2023 | 2007 | 2023 | 2023 | 2007 | 2023 | 2023 | |
| Pic | 94 | 1,03 | 7,28 | 7,43 | 588 | 550 | 538 | |
| Clo | 87 | 9,01 | 16,54 | 16,54 | 850 | 738 | 738 | |
| Lec | 80 | 2,69 | 13,41 | 13,41 | 1 150 | 925 | 925 | |
| Gra | 79 | 3,58 | 9,58 | 10,66 | 425 | 338 | 300 | |
| Lan | 70 | 1,37 | 8,25 | 9,34 | 3 125 | 2 175 | 1 900 | |
| Hau | 77 | 1,40 | 5,56 | 8,54 | 438 | 338 | 213 | |
| Gre | 45 | 2,06 | 10,53 | 17,33 | 138 | 63 | 38 | |
| Pen | 74 | 1,03 | 3,73 | 9,66 | 950 | 700 | 250 | |
| Cha | 38 | 0,88 | 3,15 | 4,43 | 488 | 188 | 125 | |
| Bla | 41 | 1,23 | 4,20 | 10,04 | 463 | 188 | 75 | |
| Cro | 8 | 0,69 | 6,90 | 8,44 | 825 | 63 | 50 | |
| Mic | 41 | 0,95 | 1,26 | 6,64 | 488 | 200 | 25 | |
| Opt | 8 | 0,60 | 2,86 | 5,36 | 638 | 50 | 25 | |
| Lai | 3 | 0,73 | 7,58 | 11,25 | 1 075 | 38 | 25 | |
| Caj | 20 | 0,55 | 0,19 | - | 125 | 25 | 0 | |
| Mer | 0 | 0,57 | - | - | 200 | - | - | |
| Les | 0 | 0,23 | - | - | 38 | - | - | |
| Moyenne | 54* | 1,68 | 6,73 | 9,93 | | | | |

* Total de 922 chênes rouges mesurés en 2007 pour l'ensemble des stations.
Total de 498 chênes rouges mesurés en 2023 pour l'ensemble des stations.

Matrices des corrélations (Pearson) et modèles de régression pour le chêne rouge

Les Figures 2 et 3 présentent les matrices des corrélations incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges (avec ou sans rejets) en 2023. Ces matrices sont issues d'une sélection préalable d'une matrice initiale (jeu de données) qui contenait toutes les variables mesurées. Un code de gradation de coloration a été utilisé, afin de faire ressortir les relations positives (rouge) et négatives (violet) entre les variables. À titre d'exemple (Figure 2), la hauteur (m) des chênes rouges en 2023 est corrélée négativement avec la surface terrière 2007 (-0,54), négativement avec la surface terrière 2023 (-0,32), positivement avec la densité des gaules 2007 (0,70), négativement avec la densité des gaules 2023 (-0,11), négativement avec la hauteur des peuplements (-0,50) et négativement avec l'âge des peuplements (-0,70). Il est à noter que nous obtenons sensiblement le même patron pour les chênes rouges sans les rejets (Figure 3).

Le Tableau 3 montre les résultats de différents modèles de régression entre la hauteur des chênes rouges (avec ou sans rejets) et les variables biotiques des peuplements (stations). On remarque que les relations les plus significatives sont retrouvées principalement en lien avec la surface terrière de l'année 2007 (hauteur des chênes avec rejets $R^2= 0,33$, $p< 0,002$), de la densité des gaules de la même année également (hauteur des chênes sans rejets $R^2=0,54$, $p<0,001$), et dans une moindre mesure pour la hauteur et la surface terrière des peuplements en 2023. Enfin, la densité des gaules en 2023 ne représente plus une variable explicative après plus de 20 ans pour les chênes rouges reboisés par enrichissement.

La Figure 4 illustre les relations hautement significatives entre la hauteur des chênes rouges et l'âge des peuplements en 2023, autant au niveau de l'ensemble des chênes mesurés (avec les rejets, $R^2=0,38$ $p<0,001$), que pour ceux de plus forts gabarits (sans les rejets, $R^2=0,46$ $p<0,001$). Dans les deux cas, il s'agit de relations significatives négatives, ce qui implique que les stations âgées du dispositif en 2023 présentent en général des croissances faibles pour les chênes rouges reboisés par enrichissement dans ces peuplements. Il est à noter que le modèle de régression pour les chênes rouges sans rejets, incluant que les arbres d'une hauteur supérieure à 1,3 m, est légèrement plus robuste que celui regroupant tous les chênes.

Corrélations de Pearson pour les chênes avec rejets

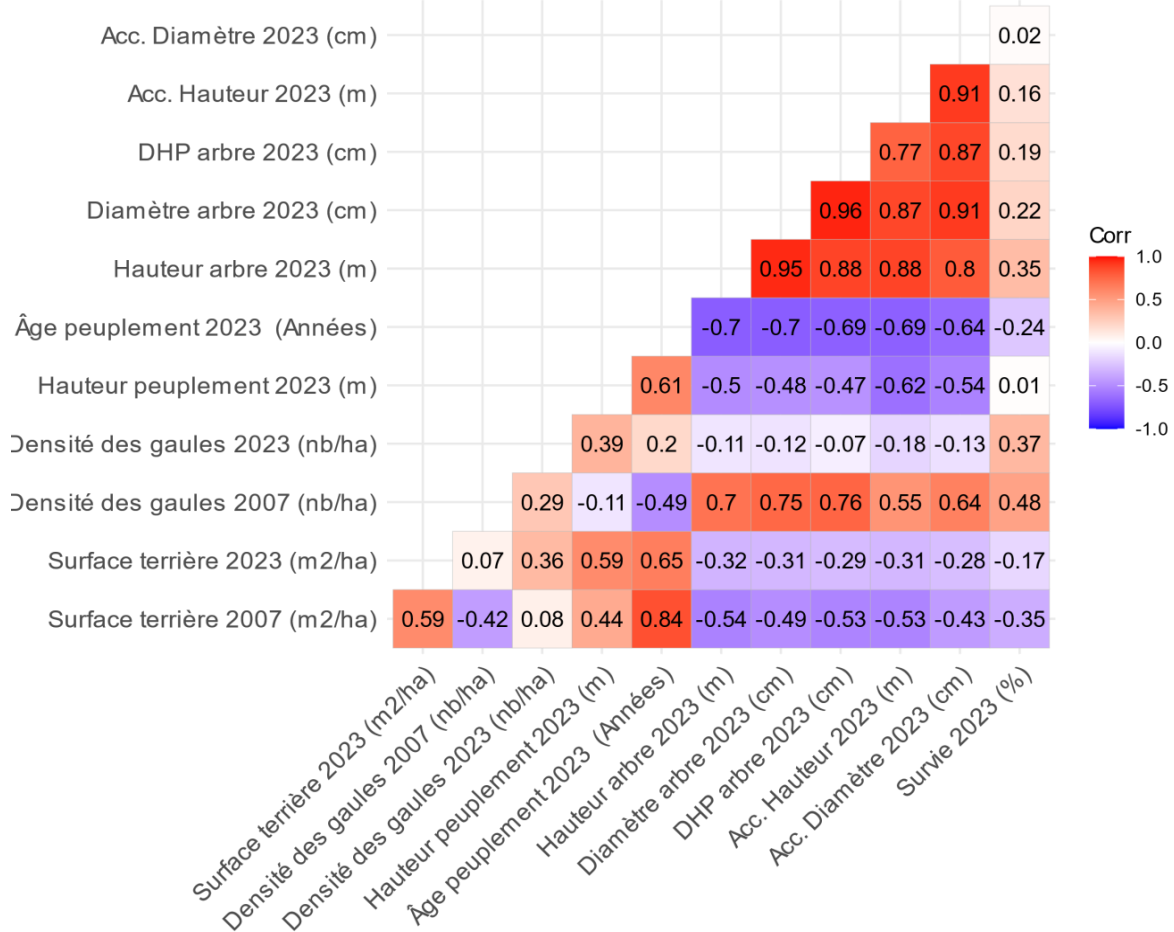


Figure 2 Matrice des corrélations (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges (avec rejets) mesurés en 2023.

Corrélations de Pearson pour les chênes sans rejets

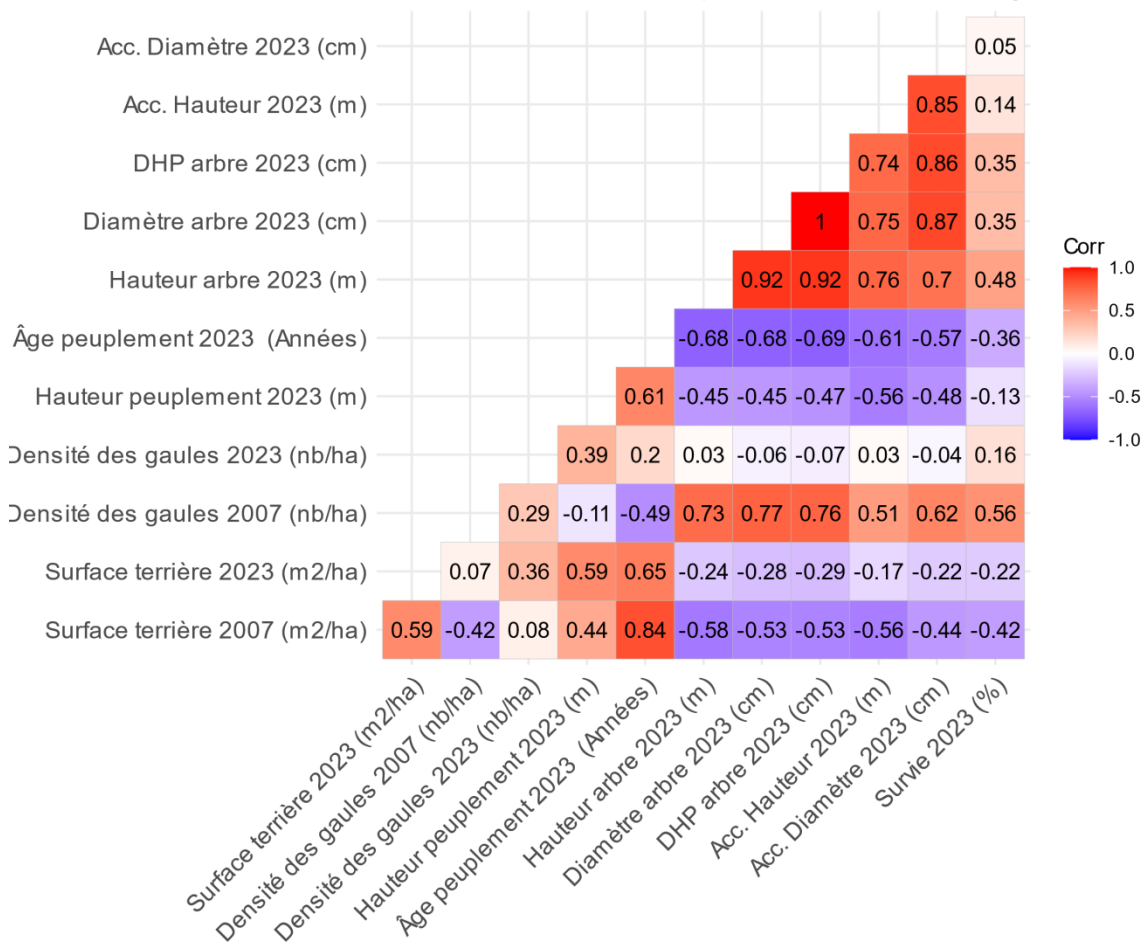


Figure 3 Matrice des corrélations (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des chênes rouges (sans rejets) mesurés en 2023.

Tableau 3 Modèles de régression entre les variables biotiques des peuplements (stations) et la hauteur (m) des chênes rouges (avec ou sans rejets) reboisés par enrichissement

| Variables biotiques | n | Équations | R ² | Valeurs - p |
|--------------------------------|----|----------------------|----------------|--------------|
| Hauteur peuplement 2023 | | | | |
| Hauteur des chênes avec rejets | 27 | Y = 16.3 - 0.511x | 0.12 | 0.072 |
| Hauteur des chênes sans rejets | 23 | Y = 18.1 - 0.447x | 0.20 | 0.032 |
| Surface terrière 2023 | | | | |
| Hauteur des chênes avec rejets | 27 | Y = 11.2 - 0.204x | 0.14 | 0.052 |
| Hauteur des chênes sans rejets | 23 | Y = 11.7 - 0.0899x | 0.06 | 0.273 |
| Surface terrière 2007 | | | | |
| Hauteur des chênes avec rejets | 27 | Y = 12.0 - 0.383x | 0.33 | 0.002 |
| Hauteur des chênes sans rejets | 23 | Y = 13.3 - 0.281x | 0.34 | 0.004 |
| Densité des gaules 2023 | | | | |
| Hauteur des chênes avec rejets | 27 | - | - | - |
| Hauteur des chênes sans rejets | 23 | Y = 9.82 + 0.000113x | 0.01 | 0.882 |
| Densité des gaules 2007 | | | | |
| Hauteur des chênes avec rejets | 27 | Y = 4.3 + 0.00106x | 0.35 | 0.001 |
| Hauteur des chênes sans rejets | 23 | Y = 7.64 + 0.000868x | 0.54 | 0.001 |

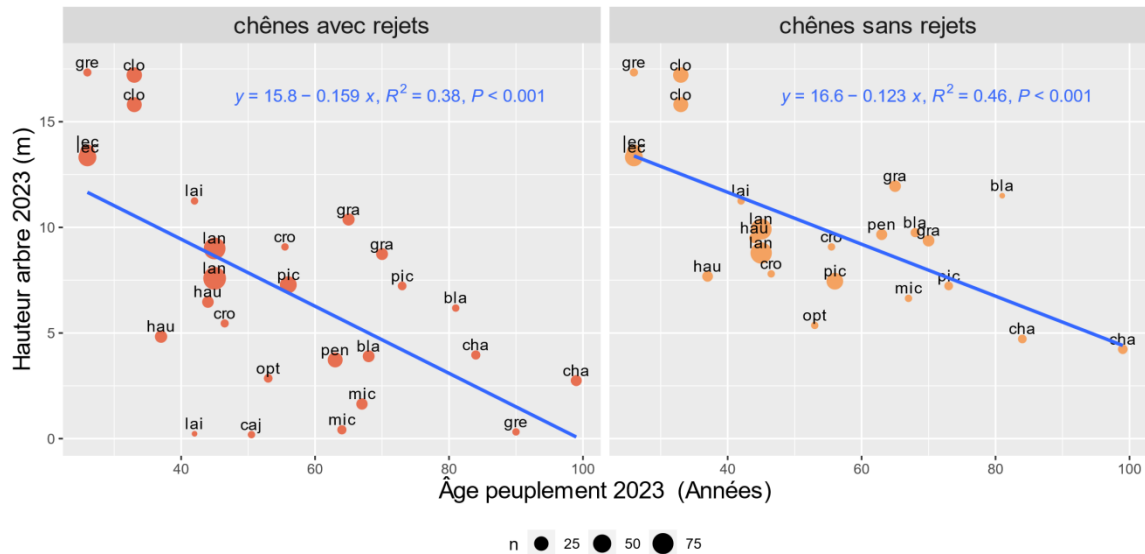


Figure 4 Relations entre la hauteur des chênes rouges reboisés et l'âge des peuplements (stations) en 2023. Le nombre de chênes mesurés pour chaque station est représenté à l'aide d'un pictogramme indiquant un regroupement allant de 0-25, 26-50, 51-75 et plus.

Survie, hauteur et densité (tiges/ha) des pins blancs reboisés par enrichissement

Le Tableau 4 présente, pour chacune des 7 stations échantillonnées en 2023, les données moyennes de survie, de hauteur et de la densité (tiges/ha) des pins blancs. On remarque tout d'abord des écarts importants de pourcentage de survie, passant de 89 % pour la station **Pen** à 14 % pour la station **Gra**. On note également un taux de survie moyen du pin blanc de 35 % pour l'ensemble des stations. Donc, près du deux tiers des arbres sont morts depuis le suivi de 2007. On note également qu'une disparité est présente pour la hauteur moyenne des pins en 2023, allant de 11,60 m pour la station **Pen** à 3,02 m pour la station **Ait**. Il est intéressant de mentionner que ces écarts sont toutefois moindres que pour les données de hauteur du chêne rouge (Tableau 2). En 2023, on observe le même phénomène au niveau de la densité des tiges/ha, où la station **Pen** présente la valeur la plus grande (800 tiges/ha) comparativement à la station **Gra** (63 tiges/ha).

Tableau 4 Survie (%), hauteur (m) et densité (tiges/ha) des pins blancs

| Stations | Survie (%) | Hauteur (m) | | Densité (tiges/ha) | |
|------------|------------|-------------|-------|--------------------|------|
| | 2023 | 2007 | 2023 | 2007 | 2023 |
| Pen | 89 | 2,36 | 11,60 | 900 | 800 |
| Pic | 78 | 1,09 | 7,89 | 450 | 350 |
| Bou | 40 | 0,70 | 6,67 | 563 | 225 |
| Caj | 30 | 0,70 | 5,40 | 538 | 163 |
| Opt | 24 | 1,33 | 6,15 | 775 | 188 |
| Ait | 20 | 0,84 | 3,02 | 1 000 | 200 |
| Gra | 14 | 1,81 | 4,87 | 450 | 63 |
| Moyenne | 35* | 1,26 | 6,51 | | |

* Total de 321 pins blancs mesurés en 2007 pour l'ensemble des stations.
Total de 113 pins blancs mesurés en 2023 pour l'ensemble des stations.

Matrices des corrélations (Pearson) et modèles de régression pour le pin blanc

La Figure 5 présente les matrices des corrélations incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des pins blancs en 2023. À l'image de la méthodologie utilisée pour le chêne rouge, ces matrices sont issues d'une sélection préalable d'une matrice initiale (jeu de données) qui contenait toutes les variables mesurées. Un code de gradation de coloration a été utilisé, afin de faire ressortir les relations positives (rouge) et négatives (violet) entre les variables. À titre d'exemple, la hauteur (m) des pins blancs en 2023 est corrélée négativement avec la surface terrière 2007 (-0,42), négativement avec la surface terrière 2023 (-0,16), négativement avec la densité des gaules 2007 (-0,02), positivement avec la densité des gaules 2023 (0,08), négativement avec la hauteur des peuplements (-0,14) et négativement avec l'âge des peuplements (-0,10).

Le Tableau 5 montre les résultats de différents modèles de régression entre la hauteur des pins blancs et les variables biotiques des peuplements (stations). À la différence des modèles de régression pour le chêne rouge (Tableau 3), on remarque qu'il n'y a pas de relations significatives en lien avec la densité des gaules en 2007 et 2023, la hauteur et l'âge des peuplements et la surface terrière en 2023. Enfin, la surface terrière (2007) des peuplements est la seule variable dont le modèle de régression montre un coefficient de détermination plus élevé ($R^2=0,18$) et une probabilité associée plus grande également ($p<0,175$), toutefois ne présentant pas une valeur significative statistiquement parlant dans ce cas.

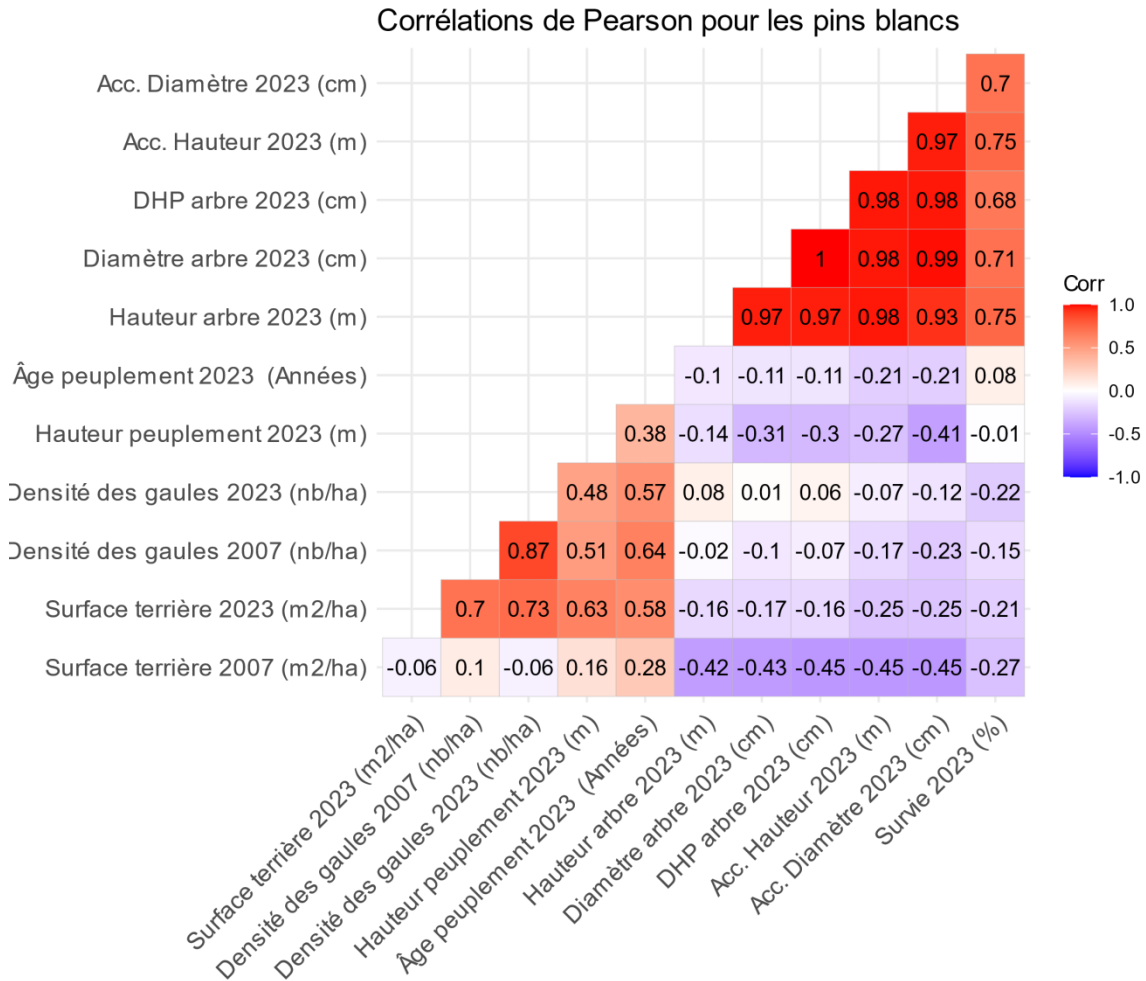


Figure 5 Matrice de corrélation (Pearson) incluant les variables biotiques des peuplements (stations) et les paramètres de croissance des pins blancs mesurés en 2023.

Tableau 5 Modèles de régression entre la hauteur (m) des pins blancs reboisés par enrichissement et les variables biotiques des peuplements (stations)

| Variables biotiques | n | Équations | R ² | Valeurs - p |
|--------------------------------|----|-------------------------|----------------|-------------|
| Âge du peuplement 2023 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 7.37 - 0.0279x$ | 0.01 | 0.757 |
| Hauteur peuplement 2023 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 9.89 - 0.201x$ | 0.02 | 0.672 |
| Surface terrière 2023 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 6.84 - 0.561x$ | 0.02 | 0.630 |
| Surface terrière 2007 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 9.57 - 0.290x$ | 0.18 | 0.175 |
| Densité des gaules 2023 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 5.65 + 0.000175x$ | 0.01 | 0.802 |
| Densité des gaules 2007 | | | | |
| Hauteur des pins | 12 | $Y = 5.87 - 0.0000316x$ | 0.01 | 0.960 |

Discussion

Le chêne rouge

Cette étude a montré l'importance du suivi à long terme des parcelles de chênes rouges reboisés par enrichissement en Estrie afin de vraiment valider l'efficacité de ce type de plantation sur le territoire. En effet, il est frappant de constater que près de la moitié des chênes rouges sont morts en l'espace de 16 années, soit depuis le premier mesurage des parcelles (2007) et que le chêne (hauteur sans rejet) n'est plus répertorié pour trois stations en 2023 (Tableau 2). Plusieurs éléments sont en cause pour expliquer ce résultat. Tout d'abord, il faut rappeler qu'en 2007, suite à l'analyse des données, trois facteurs expliquaient principalement les variations de croissance du chêne rouge soit, par ordre d'importance, le broutement par le cerf de Virginie (relation négative), la hauteur du peuplement à enrichir (relation négative) et la surface terrière des feuillus (relation négative). On peut également mentionner la densité des gaules comme un quatrième facteur lié à l'ouverture initiale du couvert et qui présentait une relation significative et positive à cette époque. Il faut mentionner également qu'en 2007, les variables édaphiques (richesse en nutriments des sols) ne présentaient pas de corrélations et de relations significatives en lien avec la croissance des chênes rouges, du moins pour les stations échantillonnées dans le cadre de cette étude.

L'analyse des données en 2023 confirme en grande partie l'importance des facteurs de la végétation des peuplements de 2007, en apportant toutefois quelques nuances (Figures 2, 3, 4 et Tableau 4). Tout d'abord, il n'a pas été possible de mesurer adéquatement le broutement par le cerf de Virginie des chênes en 2023, étant donné la forte dimension des plants, ou carrément la mort des plus affaiblis depuis 2007. Donc, ce facteur n'a pas été analysé bien qu'il ait été mesuré sur une partie des arbres plantés. Il appert cependant que l'impact du broutement dès le départ à la plantation a joué un grand rôle par la suite, selon les résultats obtenus en 2007 et partiellement en 2023, comme plusieurs études l'ont également montré en zone de la forêt tempérée (Kern et al., 2012; Long et al., 2012; Frank et al., 2018; Truax et al., 2018; Zoltan et al., 2024). Les stations déjà fortement affectées par le cerf de Virginie en 2007 et qui présentaient un bon taux de survie, mais avec des moyennes de hauteur plus faibles (1 m), ont été les plus affectées. Ceci est particulièrement évident pour les stations **Lai**, **Opt**, **Mic**, **Cro**, **Bla** et **Cha** (Tableau 2). De plus, comme un malheur n'arrive jamais seul, l'abondance du nerprun bourdaine

a également affecté négativement les chênes rouges, particulièrement pour les stations **Lai** et **Caj**, où nous avons déjà noté la présence de cette plante exotique envahissante (Tableau 1). Des espèces exotiques envahissantes ont un impact négatif majeur sur la croissance des arbres et particulièrement pour le chêne rouge. En effet, les travaux de restauration par enrichissement en Ohio de Woods et al., (2019) ont montré que le chêne rouge était l'espèce la plus affectée par la compétition de *Lonicera maackii* (chèvrefeuille de Maack), même si les plants avaient bénéficié au départ d'un dégagement chimique de la végétation concurrente et de la protection à l'aide de manchons forestiers.

Comme en 2007 la hauteur, la surface terrière et la densité des gaules des peuplements présentaient des relations significatives en lien avec la croissance des chênes rouges, nous avons validé à nouveau ces facteurs avec les données de 2023. Il appert qu'en 2023, la hauteur et la surface terrière du peuplement présentent encore une relation significative, mais moindre qu'en 2007 (Tableau 3). Toutefois, les modèles de régression entre la hauteur des chênes 2023 et certaines variables (hauteur et densité des gaules) des stations en 2007 amènent un éclairage intéressant, où dans ces cas précis, les relations sont hautement significatives (Tableau 3). Ceci implique que la dynamique de la végétation des stations en 2007 a grandement influencé la croissance des chênes par la suite et confirme également l'importance de ces facteurs sur la survie et la croissance des chênes rouges en Estrie. Il est intéressant de noter que l'âge du peuplement à enrichir a également une influence non négligeable en lien avec la croissance et la survie des chênes (Figure 4) dans le présent projet. Bien que ce facteur n'ait pas été validé en 2007, il complète bien l'analyse en 2023 et confirme l'importance de cet élément dans le choix d'une station à enrichir. En effet, nos résultats montrent que les vieux peuplements ont un impact négatif sur la croissance et la survie des chênes rouges, même si un traitement d'ouverture partielle a été effectué au préalable avant la plantation d'enrichissement, ceci étant particulièrement évident pour les stations **Cha**, **Gre** (une parcelle) et **Bla**. En général, un vieux peuplement présente une hauteur plus grande, des arbres de plus gros diamètre et souvent un sous-bois dégagé si en présence de résineux, ou tout simplement par le broutement répété du cerf de Virginie qui abonde en Estrie. L'application du traitement préparatoire de coupe avant la plantation pourrait influencer la réussite ou pas de l'enrichissement. En effet, la création de trouées (petite coupe totale) de diamètre varié en fonction des essences reboisées (ex. : une hauteur d'arbre à deux hauteurs d'arbre) pourrait donner des résultats différents dans un peuplement de surface terrière élevée comparativement à un traitement d'éclaircie ou de

coupe de jardinage. Toutefois, les limitations initiales de ce dispositif ne permettaient pas de tester cette hypothèse.

Il faut également nuancer le type d'érablières visées par l'enrichissement. Les travaux de Truax (2021) dans les peuplements dégradés dominés par l'érable rouge dans la région du Centre-du-Québec ont montré que l'enrichissement peut réussir à condition qu'une ouverture initiale soit effectuée au moment de la plantation (30 à 50 % de la surface terrière), suivi ou non par la suite d'une coupe finale ou d'un dégagement par puits de lumière qui va créer une ouverture facilitant ainsi la croissance des chênes. L'érable rouge en bouquet, typique des territoires agricoles abandonnés où les friches sur sols pauvres abondent (St-Jacques et Gagnon, 1988), n'est pas nécessairement un compétiteur critique pour les ressources dans ce type de peuplement (Kelly et Kelly, 2001; Boulet, 2020). Cette affirmation étant également vraie pour les érablières rouges (stations mésiques pauvres en éléments nutritifs), où le chêne rouge peut croître en Estrie (Gagnon et al., 2003). Les travaux de Palik et Pregitzer (1991) au Michigan ont montré également que le chêne rouge peut cohabiter avec l'érable rouge sur des sites xériques ou ayant subi de fortes perturbations. Par contre, une érablière mature (n'ayant pas comme origine une friche agricole), ayant une bonne fertilité au niveau des sols et présentant une plus grande proportion d'érable à sucre, va avoir un effet plus marqué négativement en lien avec la survie et la croissance des chênes rouges (Truax et al., 2000; 2015). Dans ce cas précis, le suivi à long terme (18 ans) a montré qu'en milieu forestier, les taux les plus élevés de survie et les accroissements les plus grands ont été mesurés dans un peuplement de feuillus intolérants issus d'un abandon de culture, présentant toutes les caractéristiques favorables à l'enrichissement (peuplement jeune, feuillus à dominance intolérants, faible hauteur, près d'un champ, peu stocké en essences désirables).

D'un point de vue pratique, il est important de suggérer une classification du degré de succès de l'enrichissement du chêne rouge de l'ensemble des sites échantillonnés en 2023 en Estrie. Bien que le pourcentage de survie soit un indicateur valable, ce dernier peut, dans certains cas, induire en erreur sur le succès réel à long terme de la plantation. De plus, il est important de calculer la densité à l'hectare des chênes ayant réellement une chance de devenir des arbres, d'où la nuance entre la mesure de la totalité des chênes (incluant les arbres plus petits et les rejets) et la mesure des arbres sans les rejets (Tableau 2). Ceci a permis de mieux discriminer ou classer les stations excellentes, moyennes ou médiocres en lien avec la croissance en hauteur

des chênes rouges dans les blocs pour un site donné. En tenant compte du taux de survie, de la hauteur moyenne et de la densité à l'hectare (sans les rejets), nous pouvons suggérer que huit stations sur 17 (près de la moitié) sont jugées excellentes (**Pic, Clo, Lec, Gra, Lan, Hau, Gre** et **Pen**), que trois sont moyennes (**Cha, Bla** et **Cro**) et six stations sont médiocres (**Mic, Opt, Lai, Caj, Mer** et **Les**). Une classification demeure toujours subjective, mais en deçà de 50 tiges à l'hectare, il est probable que les chances de produire une cohorte viable d'arbres matures diminuent fortement. Il faut également mentionner que le succès ou l'échec de l'enrichissement des chênes rouges est en lien direct avec la méthode reboisement par les conseillers il y a 20 ans, où l'utilisation de manchons forestiers était quasi inexistante afin de réduire, entre autres, le broutement des plants par le cerf de Virginie. Il est probable que la situation serait fort différente si cette méthode de protection avait été préconisée, puisque la croissance des chênes était peu reliée aux variations de richesse du sol des stations échantillonnées en 2007, mais plus en lien avec les conditions d'ouverture et de structure et de la composition du peuplement naturel.

Le pin blanc

Après seize années, soit depuis le mesurage des parcelles en 2007, nous constatons une baisse marquée de la survie pour le pin blanc sur l'ensemble des stations en 2023, où près des deux tiers des plants sont morts (Tableau 4). Cette diminution est plus importante en comparaison avec le chêne rouge et n'est pas reliée au broutement intense par le cerf de Virginie, puisque ce facteur n'était pas en cause dans la variation de la croissance des pins mesurée en 2007. De même, deux variables seulement expliquaient les variations de croissance du pin blanc en 2007, soit la densité des gaules du sapin baumier et plus faiblement, le pourcentage de recouvrement des mousses au sol. Finalement, la teneur en calcium indiquait une tendance seulement (relation négative non significative), mais intéressante tout de même. Enfin, les variables de hauteur et de surface terrière des peuplements n'expliquaient pas les variations mesurées pour la croissance radiale des pins blancs pour l'ensemble des stations en 2007. En effet, après seize ans, il n'y a pas de corrélations et de modèles de régression qui présentent des valeurs significatives entre la hauteur des pins blancs, l'âge et la hauteur du peuplement, les surfaces terrières en 2007 et 2023 et enfin, la densité des gaules en 2007 et 2023 (Figure 5; Tableau 5). Globalement, le pin blanc présente un accroissement en hauteur positif et évident pour chacune des stations entre les années 2007 et 2023, mais il n'atteint pas les valeurs mesurées pour le

chêne rouge dans les mêmes environnements. La stratégie de croissance du pin blanc en enrichissement pourrait être qualifiée de conservatrice dans l'utilisation de ses ressources, comme l'ont démontré Laungani et Knops (2009) avec cette espèce, qui a démontré une grande capacité de stockage de l'azote dans ses tissus et tout en minimisant sa perte par la litière. Jones et al., (2020) ont également montré que cette espèce n'est pas nécessairement favorisée par l'utilisation de paillis de plastique en plantation en bandes riveraines, même si ce traitement de répression de la végétation augmente considérablement la disponibilité des éléments nutritifs des sols. Il est fort probable également, que l'ouverture au moment de la plantation ait été suffisante pour maintenir une croissance moyenne depuis 20 ans puisqu'aucune des variables mesurées, en lien avec la végétation des peuplements, n'explique les variations de croissance du pin blanc, du moins pour les 7 stations et 12 blocs du projet en Estrie. Il est également fort probable qu'une ouverture initiale plus élevée aurait certainement changé la donne, mais les limitations initiales de ce dispositif ne permettaient pas de tester cette hypothèse. Nous pouvons tout de même mentionner que les taux de survie et les rendements les plus faibles ont été obtenus pour les stations **Ait** et **Gra**. L'abondance du nerprun bourdaine est certainement en cause à la station **Ait**, alors que la forte repousse des feuillus tolérants (érablière à sucre sur un site riche en éléments nutritifs et ayant un bon drainage) pourrait expliquer les résultats à la station **Gra** pour le pin blanc. Nos travaux d'enrichissement du pin blanc en forêts dégradées à St-Benoît-du-Lac montrent également que cette essence ne peut croître efficacement sur un site très fertile dominé par le frêne d'Amérique et l'érable à sucre (Truax et al., 2015; 2018). Finalement, vu le faible nombre de stations et de blocs mesurés dans le cas du pin blanc, nous devons demeurer prudents quant à l'interprétation définitive de ces résultats après plus de vingt ans. Un suivi à plus long terme permettra de vraiment vérifier si la croissance de cette espèce précieuse se maintient pour l'ensemble des peuplements. Il serait également valable, en complément de l'étude actuelle, de cibler plus de stations reboisées en pins blancs sur l'ensemble du territoire de l'Estrie.

Conclusion et implications pour l'aménagement des forêts dégradées de l'Estrie

Ce projet de recherche a permis, seize années après le premier échantillonnage, de cerner les facteurs importants liés aux variations de croissance des chênes rouges et pins blancs reboisés par enrichissement en Estrie. La croissance du chêne rouge est liée principalement à l'âge et la hauteur des peuplements en 2023, alors que la densité des gaules et la surface terrière des sites en 2007 exercent toujours une très grande influence depuis le dernier échantillonnage. Les conclusions de 2007 sont toujours valides en 2023. Elles montrent que plus le peuplement présente une faible hauteur (station jeune) et une faible surface terrière des arbres (feuillus intolérants et tolérants) au moment de la plantation, plus la croissance des chênes sera favorisée. À l'opposé, les stations plus âgées (érablières matures) ayant souvent une ouverture insuffisante, où les strates de semis et gaulis sont fortement réduites par le broutement du chevreuil, présentent les croissances les plus faibles. D'autre part, le broutement répété par le cerf de Virginie a eu un impact important pouvant expliquer en partie les résultats de survie et de croissance du chêne rouge, où près de la moitié des chênes sont morts depuis le dernier échantillonnage en 2007.

Le cas du pin blanc est intéressant, car aucune des variables biotiques des peuplements n'explique les variations de croissance pour cette essence en 2023. Nos résultats montrent que le pin blanc présente toujours un potentiel de reboisement par enrichissement en Estrie malgré un taux de survie moindre que celui du chêne rouge. Toutefois, nous devons demeurer prudents quant à une conclusion définitive étant donné le plus faible nombre de parcelles mesurées pour cette espèce en 2023. Néanmoins, cette espèce ubiquiste peut coloniser des stations qui seraient défavorables au chêne, principalement en termes de type de végétation arborescente (résineuse ou feuillu) et également au niveau de la richesse édaphique et du drainage.

Un des objectifs de cette étude était de pouvoir émettre des pistes de solutions pour améliorer l'enrichissement comme traitement sylvicole novateur en Estrie, particulièrement en lien avec les changements climatiques qui affectent déjà les écosystèmes forestiers du sud du Québec. À la lumière des résultats de cette étude, il est recommandé de diminuer la densité de plantation des chênes et pins et viser 500 plants à l'hectare et de protéger systématiquement les feuillus à l'aide de manchons forestiers afin de contrer l'effet néfaste du broutement par le cerf de Virginie. Nous recommandons le manchon de type K, développé par feu M. Peter Kilburn qui a

abondamment testé cette méthode avec succès en Estrie. Il faut également porter une attention particulière à l'envahissement du sous-bois des forêts de l'Estrie par le nerprun bourdaine avant de planifier une plantation par enrichissement et prévoir de réduire sa présence avant et après la mise en terre des plants. En combinant une coupe partielle forte ou en créant une trouée dans un peuplement naturel ou en plantation avec la protection systématique des feuillus, les aménagistes maximisent alors les chances de succès, car tout se joue au cours des premières années après la mise en terre. Il ne faut pas exclure un dégagement par puits de lumière et/ou une éclaircie subséquente dans le scénario sylvicole afin de favoriser la croissance des plants et contenir la compétition végétale.

Finalement, bien que le chêne rouge et le pin blanc soient au cœur d'une stratégie possible de restauration des peuplements forestiers de l'Estrie, il faut envisager dès maintenant l'utilisation d'autres espèces d'arbres de valeur, dont les chênes blancs, les caryers, les noyers, le tilleul, l'érable à sucre, le micocoulier, le châtaignier d'Amérique, le cerisier tardif, la pruche et l'épinette rouge, sans limitations d'ajout d'autres essences potentielles. Il faut également considérer l'utilisation d'hybrides tolérants ou des lignées indigènes résistantes de ces essences, afin de favoriser la résilience des peuplements forestiers qui subiront de grands changements d'ici la fin du siècle. La restauration de l'écosystème forestier dégradé, en utilisant entre autres la méthode d'enrichissement comme mode de plantation, deviendra au fil des années un passage obligé, compte tenu de la progression fulgurante des insectes et pathogènes exotiques, qui affectent déjà négativement nos forêts, et continueront de le faire dans le futur.

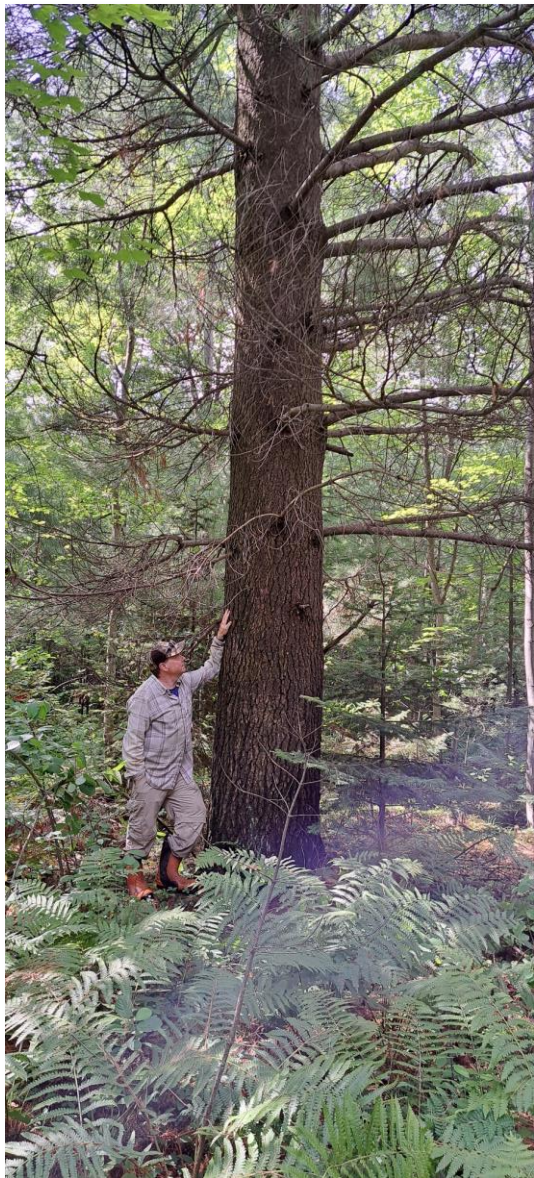
Références

- Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie, 2017. Plan de protection et de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie. 453p.
- Alamenciak, T., Pomezanski, D., Shackelford, N., Murphy, S., Cooke, S., Rochefort, L., Voicescu, S., Higgs, E. 2023. Ecological restoration research in Canada: who, what, where, when, why and how? FACETS 8: 1-11.
- Boulet, B., 2020. Mise en valeur des peuplements issus de rejets de souche avec une référence particulière à l'érable rouge. Agence forestière des Bois-Francs, Victoriaville, 43p.
- Booth, J.D., 1975. Changing forest utilization patterns in the Eastern Townships of Québec, 1800 to 1930. Faculty of graduate studies and research, McGill University. 335p..
- Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise 2004. Rapport. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 307p.
- Crow, T.R., 1988. Reproductive mode and mechanisms for self-replacement of northern red oak (*Quercus rubra*) – A review. Forest Science 34, 19-40.
- Dey, D.C., Jacobs, D., McNabb, K., Miller, G., Baldwin, V., Foster, G., 2008. Artificial regeneration of major oak (*Quercus*) species in the eastern United States-A review of the literature. Forest Science 54, 77-106.
- Frank, G.S., Rathfon, R.A., Saunders, M.R., 2018. Ten-year responses of underplanted northern red oak to silvicultural treatments, herbivore exclusion, and fertilization. Forests 9, 571.
- Gagnon, D., Truax, B., Barrette, S., 2003. Aménagement et sylviculture du chêne rouge en Estrie via la connaissance des peuplements naturels. Rapport final, Agence de mise en valeur de la forêt privée de l'Estrie. 30p.
- Gribko, L.S., Schuler, T.M., Ford, W.M., 2002. Biotic and abiotic mechanisms in the establishment of northern red oak seedlings: a review. USDA forest service, northeastern research station, General technical report NE-295, 20p.
- Hannah, P.R., 1991. Regeneration of northern hardwoods in the northeast with the shelterwood method. North. J. Appl. For. 8, 99-104.
- Johnson, P.S., 1984. Responses of planted northern red oak under three overstory treatments. Can. J. For. Res. 14, 536-542.
- Jones A., Fortier, J., Gagnon, D., Truax, B., 2020. Trading tree growth for soil degradation: Effects at 10 years of black plastic mulch on fine roots, earthworms, organic matter and nitrate in a multi-species riparian buffer. Trees, Forests and People 2, 100032.
- Kelly, J.M., & Kelly, J.K., 2001. Phosphorus and potassium uptake kinetics in red maple seedlings. Forest Science 47, 397-402.

- Kern, C.C., Reich, P.B., Montgomery, R.A., Strong, T.F., 2012. Do deer and shrubs override canopy gap size effects on growth and survival of yellow birch, northern red oak, eastern white pine, and eastern hemlock. *For. Ecol. Manage.* 267, 134-143
- Kesteman, J.P., Southam, P., Saint-Pierre, D., 1998. Histoire des Cantons-de-l'Est. Institut québécois de recherche sur la culture. 831p.
- Laungani, R., Knops, J.M.H., 2009. Species-driven changes in nitrogen cycling can provide a mechanism for plant invasions. *PNAS* 106, 12400-12405.
- Olson, M.G., Hossain, S., Cunningham, K., Pelkki, M.H., Stuhlinger, C., 2018. Rehabilitating degraded hardwood stands on a bottomland terrace site with overstory removal and oak enrichment planting: 14-years results. *Open Journal of Forestry* 8, 459-471.
- Palik, B.J., Pregitzer, K.S., 1991. The relative influence of establishment time and height-growth rates on species vertical stratification during secondary forest succession. *Can. J. For. Res.* 21, 1481-1490.
- Povak, N.A., Lorimer, C.G., Guries, R.P., 2008. Altering successional trends in oak forests: 19-year experimental results of low-and moderate-intensity silvicultural treatments. *Can. J. For. Res.* 38, 2880-2895
- Quang, P.M., Baynes, J., Herbohn, J., Applegate, G., Keys, M. 2020. The long-term survival and growth of enrichment plantings in logged tropical rainforest in North Queensland, Australia. *Forests* 11, 386. .
- St-Jacques, C., Gagnon, D., 1988. La végétation forestière du secteur nord-ouest de la vallée du St-Laurent, Québec. *Can. J. Bot.* 66, 793-804.
- Truax, B., Gagnon, D., Chevrier, N., 1994. Nitrate reductase activity in relation to growth and N-forms in red oak and red ash planted in three different environments: forest, clear-cut and field, clear-cut and field. *For. Ecol. Manage.* 64, 71-82.
- Truax, B. 1996. Restauration écologique des forêts de feuillus par la plantation. Pages 119-134 in D. Cantin et C. Potvin, (éds.). *L'utilisation durable des forêts québécoises : de l'exploitation à la protection*. Presses de l'Université Laval, 157 p.
- Truax, B., Lambert, F., Gagnon, D., 2000. Herbicide-free plantations of oaks and ashes along a gradient of open to forested mesic environments. *For. Ecol. Manage.* 137, 155-169
- Truax, B., Gagnon, D., Lambert, F., 2015. Multiple-Use Zoning Model for Private Forest Owners in Agricultural landscapes: a case study. *Forests* 6, 3614-3664.
- Truax, B., Gagnon, D., Fortier, J., Lambert, F., Pétrin, M.A., 2018. Ecological factors affecting white pine, bitternut hickory and black walnut underplanting success in a northern temperate post-agricultural forest. *Forests* 9, 50-73
- Truax, 2021. Effet de l'ouverture du couvert forestier après 5 ans sur la croissance de chênes rouges reboisés par enrichissement de forêts dégradées du Centre-du-Québec. Agence forestière des Bois-Francis, 33p.
- Woods, M.J., Cobb, M., Hickie, K., McEwan, R.W., 2019. Assessing the efficacy of seedling planting as a forest restoration technique in temperate hardwood forests impacted by invasive species. *Forests* 10, 699.

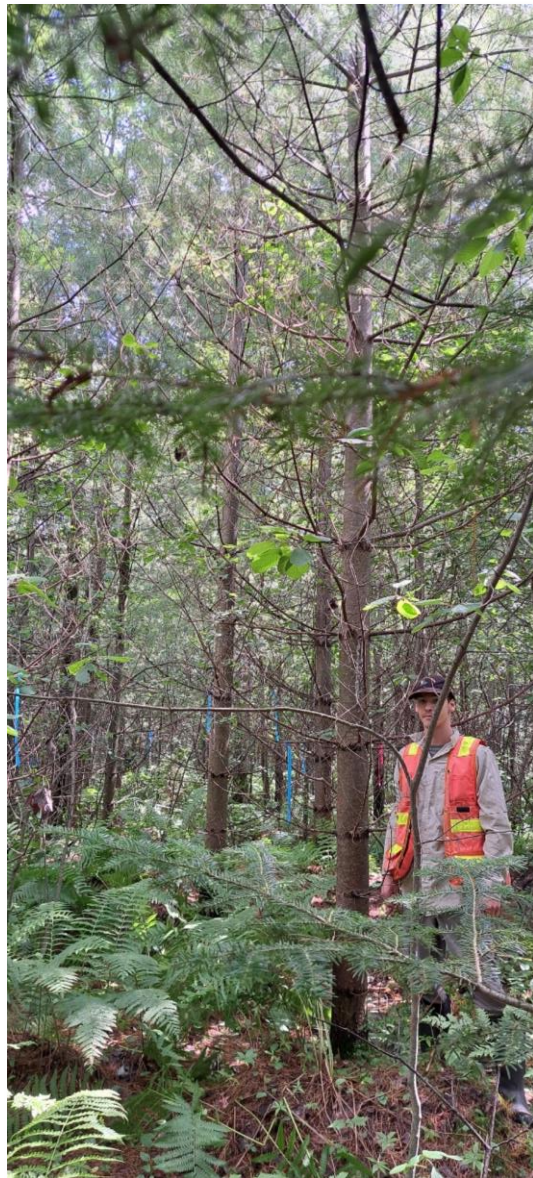
Zoltan, L., Szmorad, F., Standovar, T., 2024. Heavy ungulate pressure behind the disappearance of regeneration in hungarian forests. *Forests* (15), 54.

ANNEXE



Station Pen (Melbourne) - juillet 2023

Pin blanc mature issu de la régénération naturelle retrouvé sur le site. À noter la forte présence de fougères et de sapins baumiers pour une station à drainage imparfait et présentant une forte pierrosité.



Station Pen (Melbourne) - juillet 2023

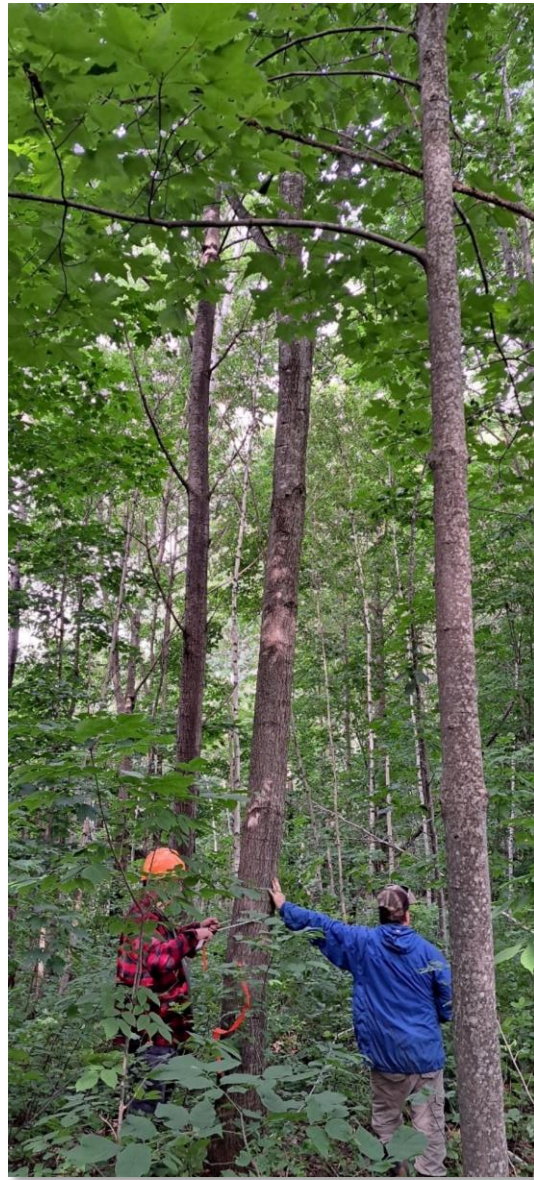
Pin blanc reboisé par enrichissement en 2001. À noter la faible présence de la repousse de feuillus de valeur très représentative d'une station mésique pauvre en éléments nutritifs où l'érable rouge dominait le peuplement initial.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Lec (Stanstead) - août 2023

Chêne rouge reboisé en plantation en 2000 suite à la coupe de récupération d'un important chablis du peuplement d'origine.



Station Clo (Melbourne) – août 2023

Chêne rouge reboisé en plantation en 1991 suite à une coupe totale d'une vieille friche de feuillus intolérants. À noter la forte présence de semis et gaules de frênes d'Amérique.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Lai (Hatley) - juillet 2023

Chêne rouge reboisé par enrichissement en 2003 suite à la création de trouées et ayant réussi à percer le couvert dense de nerprun bourdaine malgré un fort broutement par le cerf de Virginie.



Station Ait (Sherbrooke) – juillet 2023

Pin blanc reboisé par enrichissement en 2005 suite à une combinaison d'éclaircie, de trouées et d'annelage subissant une forte compétition par le nerprun bourdaine.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Pen (Melbourne) - juillet 2023

Chêne rouge reboisé par enrichissement en 2001 ayant réussi à croître malgré la repousse de rejets d'érable rouge issus de la coupe partielle de 50 % avant la plantation. À noter la faible distance (1 mètre) entre les rejets de souche et le chêne.



Station Gre (Racine) - juillet 2023

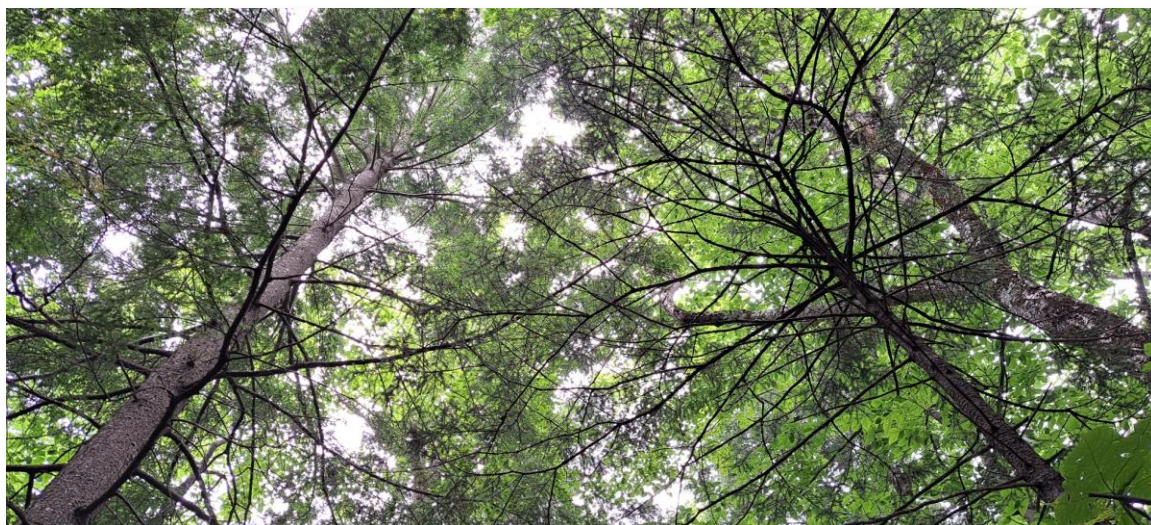
Chêne rouge reboisé par enrichissement en 1999 (à l'arrière-plan avec présence d'un ruban orange). À noter la forte densité des gaules de feuillus tolérants issus de la coupe totale initiale du peuplement, où le hêtre était une composante importante. À noter également le dépérissement du hêtre atteint par la maladie corticale et l'abondante litière peu décomposée au sol.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Mer (Ulverton) - juillet 2023

Échec de l'enrichissement du chêne rouge reboisé en 2002 suite à une éclaircie commerciale de 30 %. À noter l'importante surface terrière d'érable à sucre et l'absence de régénération naturelle (semis et gaules) indiquant possiblement un broutement intense par le cerf de Virginie depuis l'année de l'enrichissement.



Station Gre (Racine) - juillet 2023

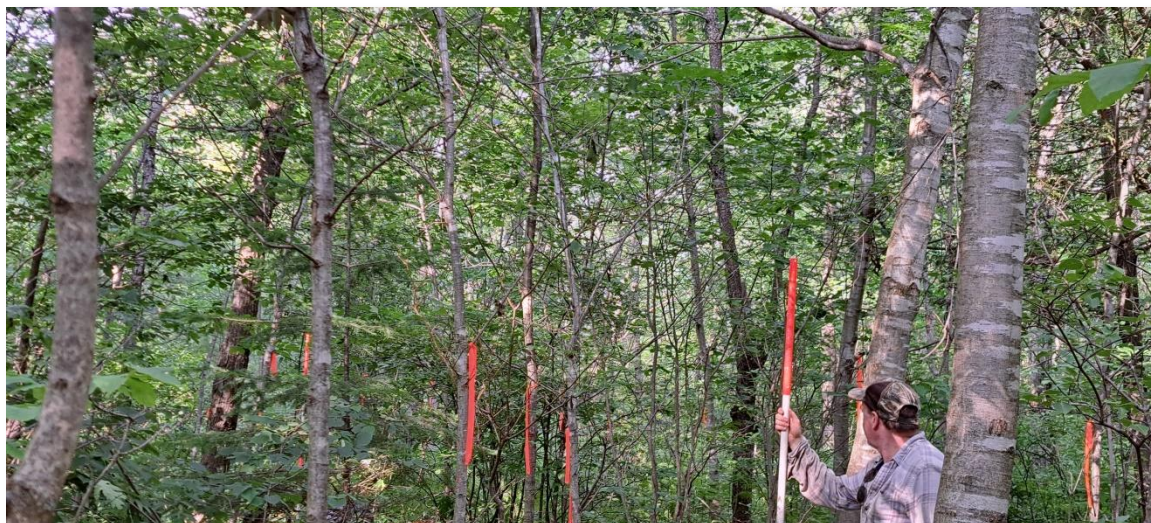
Échec de l'enrichissement du chêne rouge reboisé en 1999. À noter l'importante fermeture du couvert forestier suite à une coupe de récupération partielle - verglas et la forte composition en pruches du peuplement.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Lan (Wotton) - août 2023

Chêne rouge reboisé par enrichissement en 2002 suivant une coupe de récupération par trouée suite au verglas dans une plantation de pins gris. Les tiges résiduelles de pins gris ont été récoltées en 2016 et la superficie reboisée en épinette blanche.



Station Pic (St-Denis-de-Brompton) - juillet 2023

Chêne rouge reboisé par enrichissement en 2003 à la suite d'une coupe partielle de 50 %. Dégagement par puits de lumière en 2008.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Bou (Ste-Catherine-de-Hatley) - août 2023

Pin blanc reboisé par enrichissement en 2005 à la suite de la création d'une trouée. Station à drainage imparfait et présence de nerprun bourdaine et cathartique en bouquet.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Gra (Dudswell) - août 2023

Chêne rouge reboisé par enrichissement en 2001 dans une érablière à sucre à la suite de la tempête de verglas de 1998.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Mic (Ham-Sud) - juillet 2023

Chêne rouge reboisé en enrichissement en 2003 à la suite d'une création d'une trouée et brouté à multiples reprises.



Station Pic (St-Denis-de-Brompton) – juillet 2023

Pin blanc reboisé en enrichissement en 2003 à la suite d'une coupe partielle de 50 %. Dégagement par puits de lumière en 2008.

Crédit photo : M.-J. Martel, 2023



Station Caj (Ulverton) - juillet 2007

Chêne rouge (ruban rose) et pin blanc (ruban orange) reboisés par enrichissement en 2004 dans une trouée. Le pourcentage de recouvrement du nerprun bourdaine est évalué à moins de 25 %.



Station Caj (Ulverton) - juillet 2023

Même station que la photo précédente. Le pourcentage de recouvrement des semis additionné à celui des gaules de nerprun bourdaine est évalué 115 % seize ans plus tard.



Station Ait (Sherbrooke) - août 2007

Vue générale de la station **Ait** reboisé en pin blanc par enrichissement en 2005. Le pourcentage de recouvrement des semis de nerprun bourdaine est évalué à moins de 25 %.



Station Ait (Sherbrooke) – juillet 2023

Même station que la photo précédente. Le pourcentage de recouvrement des semis additionné à celui des gaulis de nerprun bourdaine est évalué 175 % seize ans plus tard.

