UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

FACTEURS DÉTERMINANTS DU SUCCÈS D'ÉTABLISSEMENT DES PLANTATIONS D'ARBRES EN COULÉE AGRICOLE EN CONDITIONS RÉELLES

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
ISABELLE GRENIER

OCTOBRE 2026

REMERCIEMENTS

Ce projet de maîtrise a été rendu possible grâce au soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, par l'entremise d'une subvention Alliance octroyée à mon directeur, en partenariat avec Jour de la Terre Canada, le Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs et l'Union des producteurs agricoles.

Je tiens premièrement à souligner la participation inestimable des agriculteurs qui ont accepté de prendre part à ce projet. Merci de vous être engagés dans des initiatives d'agroforesterie et de boisement sur vos terres. Vous faites preuve d'un véritable esprit d'avant-garde en agroforesterie et en restauration des coulées agricoles au Québec, tout en incarnant une vision porteuse d'espoir pour un environnement plus durable. Merci de m'avoir permis d'accéder à vos terres, mais aussi pour votre passion. Je vous en serai toujours profondément reconnaissante.

Merci à Antoine Mathieu et à Marc-Olivier Martin-Guay pour votre soutien et votre aide préciseuse tout au long de mon étude. Merci pour tout le temps que vous m'avez accordé et pour avoir répondu à mes mille et une questions.

Je tiens à remercier ma fabuleuse équipe terrain, sans qui ce projet n'aurait pas été possible. Merci Eddy, Daphnée, Érick, Ève-Marie et Antoine. Votre énergie et votre détermination ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Je garde d'excellents souvenirs de ces longs mois passés sur le terrain grâce à vous.

Un remerciement spécial à Srjdan Ostojic et Laurence Danvoye pour leur aide, leur soutien et leur patience durant mon passage au laboratoire.

À mon directeur, David Rivest, j'offre mes plus sincères remerciements. Tes conseils, ton aide et ton encadrement ont été d'une valeur inestimable. Sans toi, ce projet n'aurait pas pu être une réussite.

Merci également à mon conjoint Patrick pour ses encouragements constants et son soutien au cours des dernières années. Merci à Gaston et Kiba, mes fidèles compagnons, qui m'ont accompagnée et soutenue pendant des nombreux mois de rédaction.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ii
LISTE DES FIGURES v
LISTE DES TABLEAUX viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES ix
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS x
RÉSUMÉ xi
1. INTRODUCTION 1
1.1. Problématique 1
1.2. État des connaissances 3
1.2.1. Les coulées agricoles 3
1.2.2. Conditions édaphiques et climatiques des sites de plantation 4
1.2.3. Les espèces plantées 5
1.2.4. La gestion de la végétation concurrente 6
1.2.5. La protection des plants contre la faune terrestre 7
1.2.6. Facteurs techniques associés à la mise en place des plants 8
2. OBJECTIFS, QUESTION ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE 9
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES 11
3.1. Sites d'étude 11
3.2. Variables mesurées 15
3.2.1. Facteurs abiotiques 15
3.2.2. Facteurs biotiques 15
3.2.3. Facteurs techniques 16
3.2.4. Survie et dimensions des arbres 17
3.3. Analyses statistiques 17
4. RÉSULTATS 19
4.1. Caractéristiques biophysiques des coulées agricoles 19
4.2. Taux de survie 19
4.3. Croissance des arbres 21
4.3.1. Épinette blanche 24
4.3.2. Chêne à gros fruits 24
4.3.3. Mélèzes 26
4.3.4. Érable rouge 28
4.3.5. Chêne bicolore 29
4.3.6. Érable à sucre 29
4.3.7. Chêne rouge 31
4.4. Défauts, descente de cime, herbivorie et insectes 32
4.5. Indices de biodiversité 34
5. DISCUSSION 35
5.1. Une survie élevée malgré des conditions contraignantes 36
5.2 Pratiques sylvicoles et pente comme principaux déterminants de la croissance 38
5.2.1. Protection contre l'herbivorie 39
5.2.2. Compétition des plantes herbacées 39
5.2.3. Pente et position topographique 40
5.2.4. Exposition de la pente 41
5.2.5. Propriétés physico-chimiques du sol 41
5.3. Défauts des plants d'arbres associés à des stress abiotiques et biotiques 41

5.4. Diversité des espèces d'arbres 42
6. CONCLUSION 43
6.1. Synthèse des principaux résultats 43
6.2. Limites de l'étude 44
6.3. Perspectives de recherche 45
BIBLIOGRAPHIE 47
ANNEXE A 54
ANNEXE B 55
ANNEXE C 56
ANNEXE D 58

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de la localisation des sites échantillonnés. 13

Figure 2. Plan d'échantillonnage de la végétation herbacée et des carottes de sol au sein d'une parcelle d'inventaire..... 14

Figure 3. Vue d'une coulée agricole échantillonnée à St-Aimé (A) et disposition des parcelles dans les trois sections typiques d'une coulée agricole : haut, milieu et bas de pente (B). 14

Figure 4. Taux de survie en fonction de l'abondance d'arbustes (A), du type d'arbre (B), de la présence de fauchage (C) et du type de paillis (D). Les points représentent le taux de survie par parcelle et la courbe représente la prédiction du modèle avec ses intervalles de confiance à 95 % (A). La taille des barres correspond au nombre d'observations pour chaque catégorie ainsi qu'à la proportion d'arbres morts ou en état critique (M, en blanc) versus vivants (V, en gris). Des lettres différentes indiquent des différences significatives (comparaisons multiples avec correction de Tukey pour B et D; $P < 0,05$). 21

Figure 5. Volume conique de toutes les espèces ayant au minimum 30 individus vivants ou en état critique en fonction de l'âge (A) et résidus du modèle contrôlant pour l'âge en fonction de l'espèce (B). Pour A, chaque point représente un arbre. La courbe et ses intervalles de confiance à 95 % représentent la prédiction du modèle. Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation. Pour B, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0,05$). 22

Figure 6. Volume conique de l'épinette blanche en fonction de l'âge (A) et du type de paillis utilisé (B). Chaque point représente un arbre. Les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Pour B, les différences entre catégories proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey. Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation. 24

Figure 7. Volume conique du chêne à gros fruits en fonction de l'âge (A), de la position dans la pente (B), de l'inclinaison de la pente (C), de l'exposition de la pente (D) et de la présence de protecteurs sur le site (E). Chaque point représente un arbre. Les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Les différences observées pour B et D proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$) . Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation, sauf pour C. 25

Figure 8. Volume conique du mélèze en fonction de la position dans la pente (A), de la présence d'un défaut d'installation du protecteur (B), de la présence de protecteurs sur le site (C), de la profondeur d'enracinement (D), de l'inclinaison de la pente (E), de la présence de compaction du sol (F) et de l'exposition de la pente (G). Pour D et E, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Les différences observées pour A et G proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$). Les boîtes

et la ligne foncée représentent respectivement l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. 27

Figure 9. Volume conique de l'érable rouge en fonction d'un défaut d'installation du protecteur (A), de l'inclinaison de la pente (B), de la présence de fauchage sur le site (C) et de la présence de protecteurs sur le site (D). Pour A et B, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions de chaque modèle. Pour C et D, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. 28

Figure 10. Volume conique du chêne bicolore en fonction de l'âge (A), de la présence de fauchage sur le site (B), de l'abondance totale de végétation (C) et de l'exposition de la pente (D). Chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions de chaque modèle. Les différences observées pour D proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$). 29

Figure 11. Volume conique de l'érable à sucre en fonction de l'âge (A), du type de paillis (B), de la position dans la pente (C), de la présence de fauchage sur le site (D), de la présence combinée de paillis et de protecteurs sur le site (E) et de l'exposition de la pente (F). Pour A, chaque point représente un arbre, et la pente et ses intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions du modèle. Pour B à F, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. Les différences observées pour B, C et F proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$). 30

Figure 12. Volume conique du chêne rouge en fonction de l'âge (A), de l'abondance de phorbes (B), de l'abondance de graminoïdes (C), du contenu en argile du sol (D), de la présence de fauchage sur le site (E), de la classe de drainage (F), de la présence d'arbustes plantés (G) et de la présence de protecteurs sur le site (H). Pour A à D, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Pour E à H, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. 32

Figure 13. Proportion des arbres, pour chaque espèce, présentant un défaut (A), une descente de cime (B), des signes d'herbivorie (C) et des dommages causés par des insectes (D). La largeur des colonnes est directement proportionnelle au nombre d'observations pour chaque espèce (31 individus pour le caryer cordiforme et 128 pour le chêne à gros fruits). Des lettres différentes indiquent des différences significatives (comparaisons multiples avec correction de Tukey; $P < 0,05$). 33

Figure 14. Richesse spécifique (A) et indice de diversité de Shannon (B) des espèces d'arbres plantées en fonction de l'année de plantation. Pour chaque indice de diversité, l'équation de la régression linéaire,

la pente, l'intervalle de confiance à 95 %, la valeur de *P* et le coefficient de détermination sont présentés. 34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Descriptions des coulées agricoles échantillonnées. 12

Tableau 2. Facteurs analysés en relation avec la survie et la dimension des arbres dans différentes coulées agricoles. 16

Tableau 3. Résultats des régressions logistiques expliquant le taux de survie des arbres. Le nombre d'observations (N), le coefficient (uniquement pour les variables continues ou à deux modalités), le rapport de cotes (Odds ratio, le cas échéant) et la valeur de *P* du test du rapport de vraisemblance sont montrés pour chaque variable explicative. Les résultats significatifs sont indiqués en gras (* P < 0,05; ** P < 0,01). 20

Tableau 4. Résultats des régressions linéaires mixtes expliquant le volume conique pour chaque espèce d'arbre comptant au moins 80 individus vivants ou en état critique dans la base de données. Le nombre d'observations (*N*), les coefficients de détermination marginaux (effets fixes seulement) et conditionnels (effets fixes et aléatoires), ainsi que la valeur de *P* du test de rapport de vraisemblance sont montrés pour chaque variable explicative. Seules les variables marginalement significatives (. *P* < 0,1) ou significatives (* *P* < 0,05, ** *P* < 0,01, *** *P* < 0,001) sont montrées. 23

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

An Année

pH Potentiel hydrogène

Sp. Species, signifiant une espèce non identifiée d'un genre donné.

Spp. Species plurimae, signifiant « plusieurs espèces » en latin

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

cm	Centimètre
°C	Degrés Celsius
ø	Diamètre
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_2éq	Équivalent dioxyde de carbone
ha	Hectare
Mt	Mégatonne
m	Mètre
mm	Millimètre

RÉSUMÉ

Les coulées agricoles, caractérisées par des pentes marquées, des sols souvent compactés et des conditions de drainage défavorables, représentent des milieux particulièrement contraignants pour l'établissement des espèces ligneuses. Cette étude, menée sur 25 sites répartis dans plusieurs régions du Québec, a évalué le succès d'établissement de jeunes plantations (moins de 10 ans) implantées en contexte opérationnel. L'étude visait à explorer l'influence de différents facteurs abiotiques (topographie, propriétés physico-chimiques du sol), biotiques (recouvrement de la végétation spontanée, herbivorie) et techniques (fauchage, paillage, dispositifs de protection contre la faune, saison de plantation) sur la survie et la croissance des arbres. Malgré les contraintes propres à ces milieux, les résultats révèlent un taux de survie moyen de 73 %, comparable à ceux observés dans des contextes agricoles généralement considérés comme plus favorables au boisement. Contrairement à ce qui est généralement rapporté dans la littérature, où les conifères présentent souvent une survie supérieure à celle des feuillus, les feuillus ont ici montré une survie comparable à celle des conifères. L'étude met également en évidence l'importance des interactions biotiques dans le succès d'établissement des plantations. La présence d'arbustes spontanés a notamment été associée à une amélioration significative de la survie de l'ensemble des espèces d'arbres, tandis que les arbustes plantés ont favorisé la croissance de certaines d'entre elles. Ces résultats suggèrent un effet possible de facilitation, notamment par la réduction de l'herbivorie et l'amélioration des conditions microclimatiques. Parmi les pratiques de gestion évaluées, le fauchage de la végétation herbacée ressort comme l'un des facteurs ayant les effets les plus positifs sur la survie et la croissance des arbres, probablement en raison d'une réduction de la compétition pour les ressources. Les dispositifs de protection contre la faune ont également contribué à améliorer la croissance, bien qu'aucun effet significatif sur la survie n'ait été observé. À l'échelle du terrain, la croissance des arbres diminuait avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente, confirmant l'effet limitant de certaines contraintes topographiques sur l'établissement des plantations. En revanche, les propriétés physico-chimiquess du sol, telles que la texture, le pH et la classe de drainage, ont eu un effet globalement limité, possiblement en raison d'une faible variabilité entre les sites étudiés. Les conifères et certaines espèces pionnières, comme les peupliers et les bouleaux, ont présenté une croissance supérieure à celle des autres groupes d'espèces, soulignant l'importance du choix d'essences adaptées aux conditions environnementales des coulées agricoles. Dans l'ensemble, cette étude met en évidence le rôle déterminant des pratiques de gestion et des interactions biotiques dans le succès d'établissement des plantations en coulée agricole, tout en fournissant des pistes concrètes pour le développement de stratégies de boisement mieux adaptées aux contraintes des paysages agricoles.

Mots clés : coulée agricole, compétition, croissance, facilitation, plantation, sélection d'espèces, survie, terres agricoles abandonnées

1. INTRODUCTION

1.1. Problématique

Pour lutter contre les changements climatiques et la perte de biodiversité, plusieurs accords et conventions ont été signés à travers le monde au cours des dernières années. Par exemple, l'Accord de Paris, en vigueur depuis 2016, vise à limiter le réchauffement climatique à moins de 1,5 à 2,0 °C. L'accord Kunming-Montréal, instauré en 2022, vise quant à lui à protéger la biodiversité, notamment en misant sur la restauration écologique des écosystèmes terrestres. Dans ce contexte, le Canada devra orienter une part importante de ses efforts vers le secteur agricole et le changement d'utilisation des terres afin de contribuer à la fois à l'atteinte de sa cible de réduction de 40 à 45 % de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport au niveau de 2005 d'ici 2030 et à la conservation de la biodiversité (Yadav et Wang 2017; Zerriffi *et al.* 2023). Dans la foulée de ses engagements envers les différents accords internationaux associés au climat et à la biodiversité auxquels il adhère, le Canada a investi des fonds majeurs, par l'entremise de différents programmes, pour promouvoir l'adoption et la recherche de solutions climatiques pour la nature (Drever *et al.* 2021; Seddon 2022). Le boisement sur les terres agricoles abandonnées (aussi appelé « afforestation ») fait partie des solutions climatiques pour la nature qui s'annoncent prometteuses pour séquestrer du carbone dans la biomasse des arbres et les sols. Par exemple, le boisement de 3,8 millions d'hectares de terres à vocation non forestière au Canada d'ici 2030 pourrait générer, d'ici 2050, un potentiel d'atténuation de 250 Mt CO_2éq/an, soit l'équivalent d'environ 35 % des émissions totales annuelles de GES du Canada en 2021 (Drever *et al.* 2021).

Depuis de nombreuses années, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), via son programme Prime-Vert, offre des subventions aux producteurs agricoles désirant valoriser les coulées agricoles (terrains en forte pente ayant d'importantes contraintes à la mécanisation) par la plantation d'arbres. Plusieurs autres initiatives de boisement des coulées agricoles, indépendantes d'un appui du MAPAQ, ont aussi été mises en place au cours des dernières années, portées par différents organismes tels que Jour de la Terre Canada, l'Union des producteurs agricoles, des organismes de bassins versants et des organismes associés à la forêt privée. Cependant, la réussite de ces plantations demeure

peu documentée. Ces plantations intègrent souvent des espèces feuillues, qui peuvent nécessiter plus de soins et s'avèrent généralement plus délicates à implanter que les espèces résineuses, notamment en raison de leur plus grande appétence pour les cerfs de Virginie (Champagne *et al.* 2021). Ainsi, les pratiques associées aux plantations en coulées agricoles sont potentiellement plus diversifiées que celles observées dans les plantations résineuses, largement répandues et mieux documentées en Amérique du Nord. Or, l'ampleur des services écosystémiques rendus par les arbres plantés dans les coulées agricoles dépend directemment de leur succès d'établissement. Ce succès est généralement estimé à partir de certains critères de performance, notamment la survie et la croissance des arbres au cours des premières années suivant la plantation. Il est probable que la survie et la croissance des arbres implantés dans ces environnements soit très variables, en raison notamment d'une concurrence herbacée intense à maîtriser, de conditions édaphiques défavorables (e.g. sols lourds, inondés ou compactés), d'une sélection inappropriée d'espèces d'arbres, ainsi que de l'herbivorie exercée par les cerfs de Virginie, en particulier sur les espèces feuillues (Dey *et al.* 2010). La plantation d'arbres en milieu agricole constitue un défi particulier : une diversité de conditions abiotiques et biotiques, de même qu'une large gamme de techniques adoptées avant, pendant et après la plantation, peuvent influencer la survie et la croissance des arbres (Amichev *et al.* 2020; Mathieu *et al.* 2024).

Peu d'études ont exploré, à l'échelle régionale, l'influence relative des facteurs abiotiques, biotiques et techniques sur la survie et la croissance des arbres plantés dans les coulées agricoles. L'approche observationnelle proposée dans notre projet de recherche s'inscrit dans un contexte de plantation à une échelle opérationnelle et réelle, marqué par des variations substantielles entre les sites d'étude, notamment en ce qui concerne les caractéristiques biophysiques des coulées et des plantations. Les recherches évaluant l'effet de diverses pratiques et conditions environnementales sur l'établissement des arbres en plantation ont souvent été menées en contexte expérimental, où les conditions et les facteurs étudiés sont bien maîtrisés. Toutefois, ces conditions idéalisées rendent plus difficiles la transposition et la comparaison avec les contextes opérationnels (Jacobs *et al*. 2004). Notre recherche vise ainsi à réduire l'écart des connaissances entre les environnements expérimentaux et les réalités du terrain.

1.2. État des connaissances

1.2.1. Les coulées agricoles

Les coulées agricoles sont des zones désignées comme présentant des défis importants pour l'agriculture, souvent en raison de pentes très accentuées (e.g. > 15 %). La grande majorité de ces coulées sont aujourd'hui délaissées, notamment à la suite de l'abandon quasi généralisé du pâturage en production laitière. Elles se trouvent donc fréquemment en friche. Elles sont généralemment situées à proximité de cours d'eau permanents ou temporaires, ce qui les rendent inutilisables pour l'agriculture en raison de contraintes physiques, telles que le drainage du sol ou la faible accessibilité. Bien que le terme « coulée » soit largement utilisé au Québec, il n'existe pas de traduction directe en anglais. Néanmoins, des termes comme « gully », "fallow land", "agricultural set-aside", "disturbed area", "edge habitat", "prairie", "agricultural bottomland" ou "open field habitat" sont parfois employés dans la littérature anglophone pour décrire des milieux biophysiques aux caractéristiques similaires. Les coulées agricoles partagent certaines similitudes avec les bandes riveraines, notamment leur proximité aux cours d'eau, mais elles s'en distinguent par leur forme, leur composition végétale et leur taille. Contrairement aux bandes riveraines, les coulées agricoles sont généralement moins linéaires, plus étendues et leur végétation est moins directemment influencée par les milieux aquatiques (Habitat 2022).

Au Québec, selon un inventaire préliminaire, les coulées agricoles couvriraient un peu moins de 8 700 ha de terrains en friche, non utilisés à des fins agricoles (ni en cultures ni en pâturage) (https://www.habitat-nature.com/carte-coulees-agricoles). La succession naturelle de ces terres et la régénération des espèces ligneuses est généralement très lente, notamment en raison des effets résiduels des pratiques agricoles antérieures sur les sols, qui peuvent persister pendant plusieurs décennies après leur abandon (D'Orangeville *et al.* 2008). L'absence de succession naturelle des coulées serait aussi limitée par une dispersion de semences faible des arbres, une compétition herbacée intense, la présence d'espèces végétales envahissantes et la compaction des sols (Cramer *et al.* 2008; Wei *et al*. 2022). Ainsi, le rétablissement naturel des arbres dans les coulées peut prendre plusieurs dizaines d'années, ce qui justifie souvent le recours au boisement pour accélérer leur restauration écologique (Flinn et Vellend 2005).

Les plantations en coulée agricole au Québec permettraient d'augmenter le stockage en carbone de 240 % 20 ans après la mise en terre des plants d'arbres (Habitat 2022). Elles contribueraient également à l'amélioration de la qualité de l'air et la qualité de l'eau (Boulfroy *et al.* 2017). Un boisement à grande échelle des coulées favoriserait par ailleurs une augmentation de la diversité floristique et faunique au sein des agroécosystèmes, notamment en créant des corridors écologiques et en limitant la colonisation et la croissance de certaines plantes envahissantes dont le nerprun (*Rhamnus spp.)* et le roseau commun (*Phragmite australis*) (Benayas *et al.* 2007; Baah-Acheamfour *et al.* 2017). De plus, des simulations suggèrent que les plantations en coulée au Québec pourraient réduire de 82 % l'exportation des sédiments du sol vers les cours d'eau (Habitat 2022).

1.2.2. Conditions édaphiques et climatiques des sites de plantation

Le choix du site de plantation est l'un des facteurs les plus déterminants pour assurer le succès d'établissement des arbres plantés en milieu agricole. Par exemple, les sites argileux et mal drainés sont généralement moins favorables à la survie et à la croissance des arbres comparativement aux sites à texture moyenne (e.g. loams) et bien drainés (Von Althen 1991; Cogliastro *et al*. 1997). Les sols compactés, caractérisés par une densité apparente plus élevée, une résistance accrue à la pénétration des racines, une microporosité importante et des problèmes d'aération, limitent également la croissance des arbres en plantation (Boussougou *et al.* 2010). Une analyse du succès d'établissement de dix espèces de feuillus plantées sur des terres agricoles en friche a révélé que les conditions édaphiques (e.g. texture, pH, drainage) optimales varient largement d'une espèce à l'autre (Cogliastro *et al.* 1997; Cogliastro *et al.* 2003). Ces travaux ont permis de distinguer des espèces dites « généralistes », capables de tolérer un large éventail de conditions édaphiques (e.g. érable argenté, frêne d'Amérique), et des espèces dites « spécialistes », qui ne performent bien que sous certaines conditions précises (e.g. chêne rouge, érable à sucre, bouleau jaune). Plus récemment, Mathieu *et al.* (2024) ont mesuré, dans différentes haies agroforestières établies dans le sud du Québec que les taux de mortalité les plus élevés parmi 17 espèces (feuillus et conifères) étaient associés à des sols dont le pH variait entre 7 et 8. Cette alcalinité pourrait limiter la disponibilité de certains éléments nutritifs essentiels, notamment le phosphore et le manganèse, ce qui affecterait négativement la survie des arbres.

La topographie constitue l'un des principaux facteurs susceptibles d'influencer l'établissement des arbres dans les coulées agricoles. Parmi les caractéristiques topographiques, l'inclinaison de la pente joue un rôle particulièrement important puisqu'elle influence directement plusieurs propriétés physico-chimiques et

hydrologiques du sol. Une augmentation de la pente est généralement associée à une diminution de la profondeur du sol et à une intensification du ruissellement de surface, ce qui peut réduire la disponibilité en eau et en nutriments pour les végétaux, particulièrement dans les portions supérieures des versants (Fekedulegn *et al.* 2003; Lei *et al.* 2020). Ces conditions peuvent limiter l'enracinement et accroître le stress hydrique subi par les jeunes arbres en plantation. À l'inverse, les positions situées en bas de pente présentent souvent des conditions plus favorables à la croissance des arbres. Ces zones sont généralement caractérisées par des sols plus profonds ainsi que par une accumulation de matières fines, d'eau et de nutriments transportés depuis les sections supérieures du versant (Hanna *et al.* 1982; Zhang *et al.* 2021). Cette redistribution des ressources favorise généralement le développement racinaire et l'acquisition des ressources hydriques et minérales par les arbres. L'orientation de la pente représente également un facteur environnemental important pouvant moduler les conditions de croissance des plantations. En raison de leur plus forte exposition au rayonnement solaire, les versants orientés vers le sud sont généralement associés à des températures plus élevées, à une évaporation accrue et à un stress hydrique plus important pour les végétaux. À l'inverse, certaines orientations, notamment les versants ouest, peuvent offrir des conditions intermédiaires plus favorables, combinant un apport lumineux adéquat à des températures moins extrêmes et à une meilleure disponibilité en eau. Ces conditions peuvent également contribuer à réduire la compétition exercée par la végétation herbacée et ainsi favoriser le développement des jeunes arbres (Fekedulegn *et al.* 2003).

Les sécheresses et les gels printaniers sont un autre facteur abiotique important pouvant entraîner la mortalité des jeunes plants d'arbres (Margolis et Brand 1990; Visakorpi *et al.* 2024). Le gel printanier peut causer des dommages importants aux bourgeons, en particulier chez les semis produits en contenant, qui sont plus sensibles à ce type de stress que ceux produits à racines nues (Langvall *et al*. 2001). Par ailleurs, un stress hydrique sévère survenant lors de l'année d'établissement peut entraîner un taux de mortalité des plants plus important que s'il se manifeste lors de la deuxième ou troisième année suivant la plantation (Mauer *et al.* 2018).

1.2.3. Les espèces plantées

Le choix des espèces d'arbres devrait être effectué selon les caractéristiques spécifiques du site et de la zone climatique (Cogliastro *et al.* 1997; Ménétrier *et al.* 2005; Thiffault *et al.* 2013; Boulfroy *et al.* 2019). Les essences mal adaptées au site ou au climat présentent généralement un taux de mortalité plus élevé et une plus grande sensibilité aux insectes et aux maladies (Kijowska-Oberc 2020). Il est désormais bien

établi que l'augmentation de la diversité spécifique, fonctionnelle et structurelle dans les plantations mélangées, comparativement aux monocultures, tend à améliorer le succès d'établissement des arbres, leur productivité, la biodiversité associée et leur résilience face aux stress environnementaux (e.g. insectes et maladies) (Messier *et al.* 2022). Dans les coulées, les essences plantées en bas de pente devraient de préférence être hélophytes, c'est-à-dire capables de tolérer des périodes d'inondations, notamment lors de la crue printannière (Kozlowski 1997). Selon plusieurs intervenants agricoles et forestiers rencontrés au cours de ce projet de maîtrise, les plantations récentes en coulées agricoles intégreraient généralement une bonne diversité d'espèces d'arbres, adaptée à la variation des conditions édaphiques locales. Cette perception suggère que les pratiques d'aménagement des plantations se seraient améliorées, en cohérence avec les avancées récentes en écologie forestière. Des inventaires à grande échelle, comme ceux réalisés dans cette étude, sont toutefois nécessaires pour vérifier si cette tendence observée par les praticiens se confirme à l'échelle du territoire.

1.2.4. La gestion de la végétation concurrente

L'établissement des jeunes arbres sur des terres colonisées par une végétation herbacée dense est généralement difficile (De Steven 1991; Berkowitz *et al.* 1995; Gomez-Aparicio 2009; Fitchner *et al*. 2017). Les plantes herbacées qui s'installent rapidement sur les terres agricoles abandonnées peuvent nuire à l'établissement et à la croissance de nombreuses espèces d'arbres, en entrant en concurrence pour l'eau, la lumière et les éléments nutritifs du sol (Cogliastro *et al.* 1990; Benjamin *et al.* 2005; Ruskule *et al.* 2016). L'importance de la compétition entre les plantes herbacées et les plants d'arbres peut toutefois varier selon les traits fonctionnels des arbres et des plantes herbacées en précence (Mathieu *et al*. 2024). Par exemple, les espèces d'arbres pionnières possèdent généralement une proportion plus élevée de racines profondes, une plus grande longueur totale de racines et un nombre plus élevé d'apex racinaires comparativmeent aux espèces non pionnières à croissance lente (Bagniewska-Zadwarna *et al.* 2014; Zadworny *et al*. 2018). Ces traits leur permettent d'explorer un volume de sol plus important et de mieux tolérer les conditions de compétition induites par une végétation herbacée dense, notamment en contexte de limitation hydrique et nutritionnelle. De plus, en raison de leur taux de croissance plus élevé, les espèces pionnières peuvent rapidement dépasser en hauteur la végétation herbacée environnante, ce qui constitue un avantage compétitif important. Toutefois, leur établissement initial peut tout de même être entravé par la présence d'une couverture herbacée abondante (Gale *et al*. 1987). Les espèces d'arbres moyennement à fortement tolérantes à l'ombre peuvent survivre sous un certain couvert herbacé, mais leur croissance peut être grandement ralentie (Cogliastro *et al.* 1990; Hooper *et al.* 2002). D'autre part,

certains groupes taxonomiques de plantes herbacées sont réputées pour être des compétiteurs plus importants que d'autres. Par exemple, les graminées, avec leur ratio racines:tiges élevé, leur croissance clonale vigoureuse et leur capacité à produire des talles et à se propager rapidement, sont généralement considérées comme des compétitrices plus agressives que les autres plantes herbacées (Provendier et Balandier 2008). Cependant, certaines plantes herbacées à fleurs non graminoïdes, formant des communautés denses (e.g. *Solidago* sp. et *Aster* sp.) peuvent également entrer en compétition avec les semis d'arbres ou inhiber leur croissance par la production de composés allélopathiques (Horsley 1977; Burton et Bazzaz 1995; De Blois 2004; Mathieu *et al.* 2024). Plusieurs méthodes de gestion de la végétation herbacée dans les plantations établies sur des terres agricoles ont montré des effets positifs sur la survie et la croissance des jeunes arbres (Schroeder 2017). Par contre, la réponse des plants à ces interventions peut varier grandement en fonction des méthodes utilisées (e.g. herbicides, paillis, fauchage), leur intensité d'application, ainsi que les espèces d'arbres concernées (Sweeney *et al*. 2002; Truax *et al.* 2018; St-Denis *et al*. 2018). D'après les conseillers agricoles et forestiers consultés dans la phase de planification de ce projet, les pratiques de gestion de la végétation, tant au pied des arbres qu'entre les arbres, varient fortement d'un site à l'autre dans les coulées agricoles. Il semble donc pertinent de mieux comprendre, dans un contexte opérationnel, si les succès ou échecs d'établissement des arbres plantés en coulées sont associés à certaines de ces pratiques.

1.2.5. La protection des plants contre la faune terrestre

Au cours des premières années suivant leur plantation, les jeunes arbres, en particulier les espèces feuillues, sont vulnérables à l'herbivorie exercée par certains mammifères, notamment le cerf de Virginie. Par exemple, dans une étude réalisée en Indiana (États-Unis), 8 ans après plantation, on a observé une augmentation de 4 à 42 % du taux de survie et de 81 à 178 % de la croissance en hauteur de quatre espèces feuillues (chêne rouge, chêne blanc, noyer noir et cerisier tardif) lorsqu'elles étaient protégées de l'herbivorie par le cerf de Virginie (Redick *et al*. 2020). Les effets du broutage peuvent toutefois grandement varier selon les espèces. Par exemple, l'érable à sucre aurait une plus grande tolérance à l'herbivorie que d'autres espèces feuillues (Redick 2019). Le type de dispositif de protection utilisé (e.g. hauteur, taille de la maille, matériaux) ainsi que la qualité de son installation peuvent aussi influencer la croissance des jeunes arbres en plantation (Ward *et al.* 2000; Magnoux *et al*. 2018).

Les petits mammifères, comme les campagnols, peuvent également influencer la survie des semis lors des premières années de plantation. Les campagnols ont une préférence marquée pour les espèces feuillues, sur lesquelles ils peuvent provoquer la mort de jeunes plants en annelant le cambium. En plus de leur impact direct, le couvert végétal herbacé peut indirectemment accroître la prédation par les petits mammifères en leur offrant un abri contre les grands prédateurs (Ostfeld *et al.* 1993). Les lapins, les campagnols et les invertébrés peuvent causer des dommages significatifs aux jeunes arbres, mais l'ampleur de cette herbivorie dépend de divers facteurs, notamment la densité des populations de prédateurs, l'espèce d'arbre concernée, l'utilisation de protecteurs physiques, la densité et la gestion du couvert végétal, ainsi que la proximité des forêts avoisinantes (Ostfeld *et al.* 1997; St-Denis *et al*. 2018). Dans le sud du Québec, St-Denis *et al.* (2018) ont observé une vulnérabilité négligeable à la prédation de la faune pour les espèces résineuses plantées en friche agricole herbacée, suggérant que les feuillus sont généralement plus à risque dans ce type d'environnement.

1.2.6. Facteurs techniques associés à la mise en place des plants

Bien que raremment pratiquée dans un contexte de coulée, la préparation mécanique du sol avant la plantation est une pratique qui est parfois adoptée lorsque les caractéristiques du terrain sont favorables (e.g. pente modérée). Cette pratique peut, à court terme, accroître la disponibilité des éléments nutritifs du sol et de réduire temporairement la concurrence souterraine entre les plants et la végétation spontanée (Skousen *et al.* 2009). La préparation mécanique du sol est une pratique qui a montré, dans différents contextes, des effets bénéfiques sur la survie et la croissance de plusieurs espèces d'arbres (Skousen *et al.* 2009; Bilodeau-Gauthier *et al.* 2011). Néanmoins, une étude a démontré un effet négligeable de la préparation du sol sur l'établissement de certaines espèces d'arbres lorsque la végétation herbacée était déjà bien maîtrisée, notamment par l'utilisation de paillis au pied des arbres (Cogliastro *et al*. 1998).

Lors de la mise en terre des arbres, le choix de l'outil de plantation influence généralement peu le succès de l'établissement (Johnson *et al.* 1995). Par contre, le type et la qualité des plants, ainsi que l'expérience de l'équipe de plantation, peuvent être des facteurs importants pour assurer une bonne reprise des plants (Johnson *et al.* 1995; Jacobs *et al.* 2004). Les coulées agricoles sont souvent caractérisées par des sols lourds et compactés. Dans de telles conditions, la taille des plants pourrait jouer un rôle important, en influençant notamment les traits morphologiques racinaires et, par conséquent, leur capacité à explorer un sol dont les ressources sont physiquement limitées (Haase *et al.* 1993). La plantation devrait idéalement

avoir lieu tôt au printemps, afin de maximiser la période d'enracinement avant l'apparition de conditions climatiques stressantes comme les températures élevées, les sécheresses ou les vents soutenus. Les plantations d'automne sont généralement déconseillées, en particulier sur des sols argileux, en raison du risque de gel et de remontée des plants produits en récipients (Stelzer 2019).

La densité initiale de plantation constitue un autre facteur technique important, reconnu pour influencer la croissance, la survie et la compétition intra- et interspécifique des arbres en planmtation (Kremer *et al.* 2025). En effet, les arbres plantés densément ont tendance à présenter des ratios hauteur/diamètre plus élevés. De plus, les plantations à haute densité réduisent la lumière totale transmise au sol, ce qui peut limiter le développement de la végétation herbacée compétitrice et ainsi favoriser l'établissement des jeunes arbres (Kolb *et al.* 1990; Von Althen 1991; Fortier *et al.* 2011).

2. OBJECTIFS, QUESTION ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

La synthèse de nos connaissances actuelles indique que la croissance et la survie des arbres plantés en coulée agricole peuvent être influencées par une combinaison de multiples facteurs. Parmi les facteurs les plus déterminants figurent le choix des essences en fonction des conditions climatiques et édaphiques, ainsi que les pratiques de gestion appliquées avant, pendant et après la plantation, notamment le contrôle de la végétation concurrente et de l'herbivorie. Dans un contexte où les projets de boisement des coulées agricoles se multiplient au Québec et ailleurs dans le monde dans des contextes biophysiques similaires, l'objectif général de cette étude est de déterminer le succès d'établissement de différentes espèces d'arbres plantées récemment (i.e. depuis moins de 10 ans) dans les coulées agricoles et d'explorer le rôle joué par différents facteurs biotiques, abiotiques et techniques dans ce succès. Plus précisément, ce projet vise à dresser un portrait représentatif des pratiques d'établissement et d'entretien actuellement mises en œuvre dans les plantations en coulée agricole dans le sud du Québec. Il permettra aussi d'identifier les pratiques les plus prometteuses pour optimiser la survie et la croissance des arbres plantés dans ces milieux.

Plus spécifiquement, ce projet de maîtrise vise à répondre à la question de recherche suivante : quels sont les taux moyens de survie et de croissance des arbres plantés dans les coulées agricoles, et quels facteurs abiotiques, biotiques et techniques influencent le plus ces indicateurs de performance?

Comme précisé dans la problématique, cette étude adopte une approche observationnelle afin d'évaluer le succès d'établissement des arbres dans un contexte réel et opérationnel, à partir de sites présentant une forte variabilité de caractéristiques biophysiques. Cette approche permet de mieux représenter la variabilité des conditions rencontrées dans les plantations en coulées agricoles et d'obtenir un portrait plus représentatif des pratiques actuellement mises en œuvre sur le terrain (Mathieu et al. 2024). Les plantations inventoriées regroupent ainsi des individus appartenant à différentes espèces et classes d'âge, établis dans des conditions de croissance contrastées. Contrairement à une expérimentation contrôlée, où des traitements précis sont définis à l'avance, cette approche permet d'explorer simultanément l'influence de multiples facteurs environnementaux et techniques dans des conditions réelles d'implantation. Les hypothèses générales suivantes ont été formulées afin d'orienter les analyses portant sur les facteurs susceptibles d'influencer le succès d'établissement des plantations en coulées agricoles :

1) Le taux de survie des conifères plantés dans les coulées agricoles est supérieur à celui des feuillus.

2) L'absence de moyens efficaces de gestion de la végétation herbacée compétitrice et de protection contre l'herbivorie nuit davantage au succès d'établissement des espèces feuillues qu'à celui des conifères.

3) La survie et la croissance des jeunes arbres plantés varient largement selon les espèces et sont influencées à la fois par les propriétés édaphiques (e.g. drainage, texture, pH), les caractéristiques du terrain (e.g. inclinaison, position et orientation de la pente) et les techniques sylvicoles utilisées (e.g. méthodes de contrôle de la compétition herbacée et dispositifs de protection contre l'herbivorie).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Sites d'étude

L'étude a été réalisée entre juin et septembre 2024 sur 25 sites répartis dans différentes régions du Québec (Canada), principalement en Montérégie, Chaudière-Appalaches, Centre-du-Québec, Saguenay-Lac-Saint-Jean, Mauricie et Outaouais (Tableau 1, Figure 1). Dans le Système canadien de classification des sols (Soil Classification Working Group, 1998) ainsi que dans les études pédologiques québécoises qui y sont associées, les coulées agricoles ne correspondent généralement pas à des taxons pédologiques définis, allant de l'ordre jusqu'à la série de sol. Dans les cartes pédologiques, ces milieux sont plutôt désignés à l'aide de termes descriptifs tels que *pente abrupte*, *ravin*, *ravin escarpé* ou *sol sujet à l'érosion*. Sur le plan climatique, les sites se caractérisent par une température annuelle moyenne variant entre 2,0 et 6,1 °C et des précipitations annuelles se situant entre 917 mm et 1186 mm, selon les normales climatiques de 1980 à 2010, tirées de données issues de plusieurs stations météorologiques du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. Le nombre moyen de jours sans gel varie entre 109 à 173 selon les régions, les plus courtes périodes sans gel étant observés au Saguenay-Lac-Saint-Jean et les plus longues en Montérégie.

En vue de la sélection des sites, différents organismes du milieu ont été approchés durant l'hiver 2024, notamment des organismes de bassin versant, plusieurs directions régionales du MAPAQ, l'Union des producteurs agricoles et des entreprises de services-conseils en agroenvironnement. Les sites ont été sélectionnés sur une base volontaire, à partir des propriétaires ayant accepté de participer au projet. Cette approche comporte un risque de biais de sélection, une limite fréquemment raportée dans les études menées en collaboration avec des agriculteurs (Bradley *et al.* 2007). Une méthode d'échantillonnage plus systématique aurait toutefois été difficilement réalisable dans les délais du projet, en raison des difficultés à retracer l'ensemble des propriétaires ayant réalisé des plantations dans des coulées agricoles au Québec. À notre connaissance, il n'existe actuellement aucune base de données centralisée recensant ce type de boisement à l'échelle du territoire du Québec.

Tableau 1. Descriptions des coulées agricoles échantillonnées.

		n
Âge	1 à 3 ans	17
	4 à 6 ans	6
	7 à 10 ans	2
Composition	Feuillus	5
	Résineux	15
	Mixte	5
Fauchage	Présence	10
	Absence	15
Type de paillis	Plastique	16
	Carton	2
	Copeaux de bois	1
	Biodisque	2
	Aucun	4
Région	Montérégie	11
	Chaudière-Appalaches	2
	Centre-du-Québec	4
	Saguenay-Lac-Saint-Jean	4
	Mauricie	3
	Outaouais	1
Total		**25**

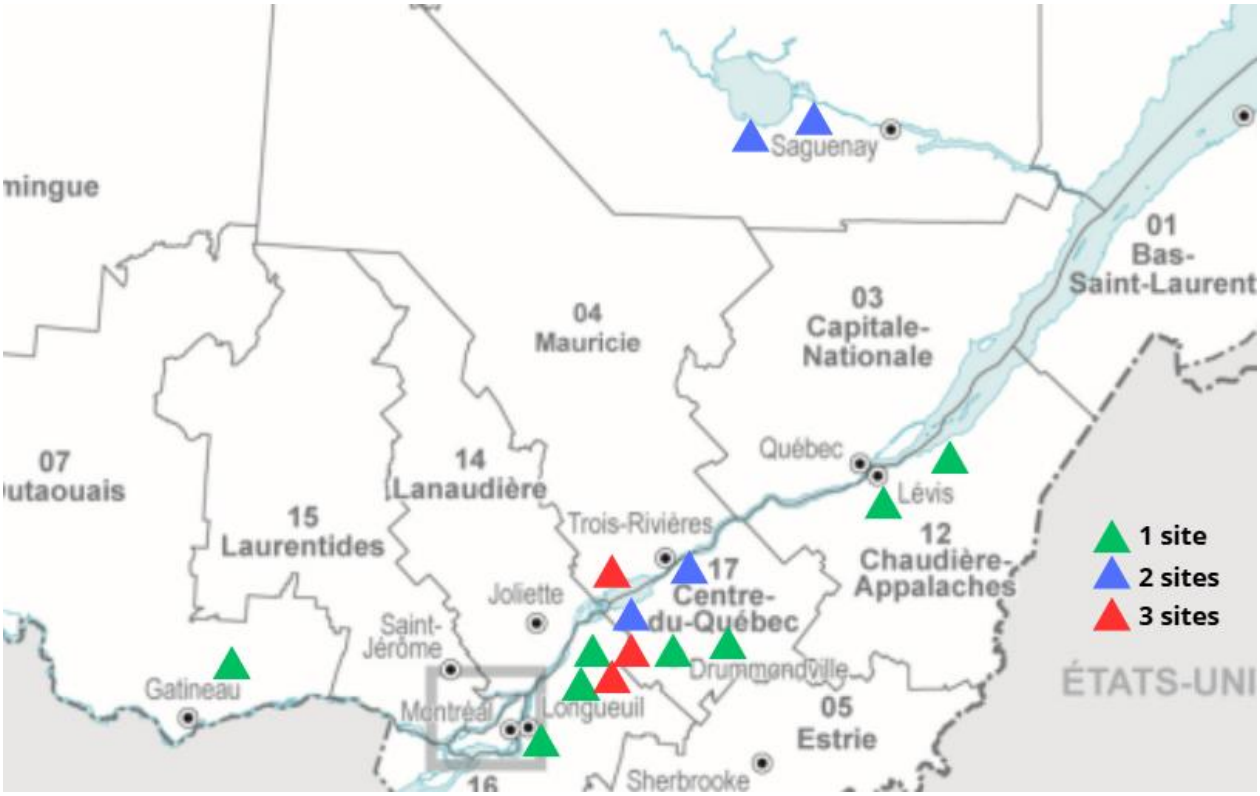

Figure 1. Carte de la localisation des sites échantillonnés.

Au total, 201 parcelles ont été échantillonnées sur les 25 sites retenus. L'inventaire terrain a été réalisé à l'aide de parcelles circulaires de 100 m^2, correspondant à un rayon de 5,64 m (Figure 2). Les parcelles ont été distribuées de façon aléatoire dans trois sections représentatives de la topographie des coulées agricoles : le haut, le milieu et le bas de pente (Figure 3). Le nombre de parcelles échantillonnées dans chaque section a été ajusté en fonction de la superficie totale de la plantation, selon une approche inspirée de Jacobs *et al.* (2004). Ainsi, pour les plantations de moins de 0,5 ha, entre 15 et 20 % de la superficie totale a été échantillonnée, alors que cette proportion variait entre 10 et 15 % pour les plantations de plus de 0,5 ha.

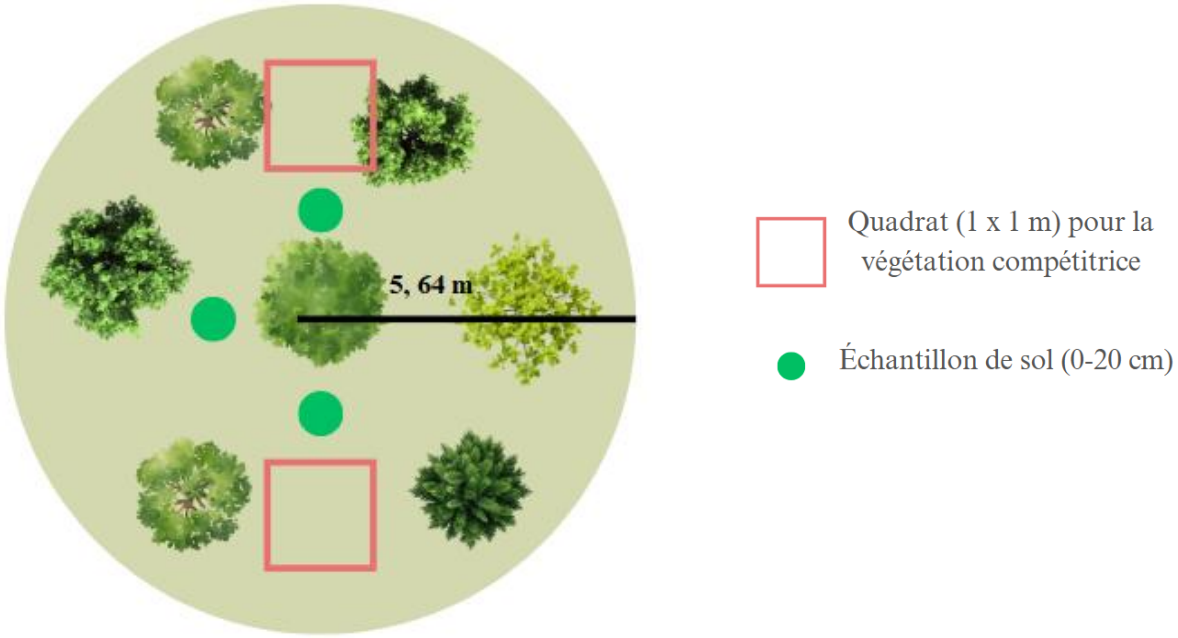

Figure 2. Plan d'échantillonnage de la végétation herbacée et des carottes de sol au sein d'une parcelle d'inventaire.

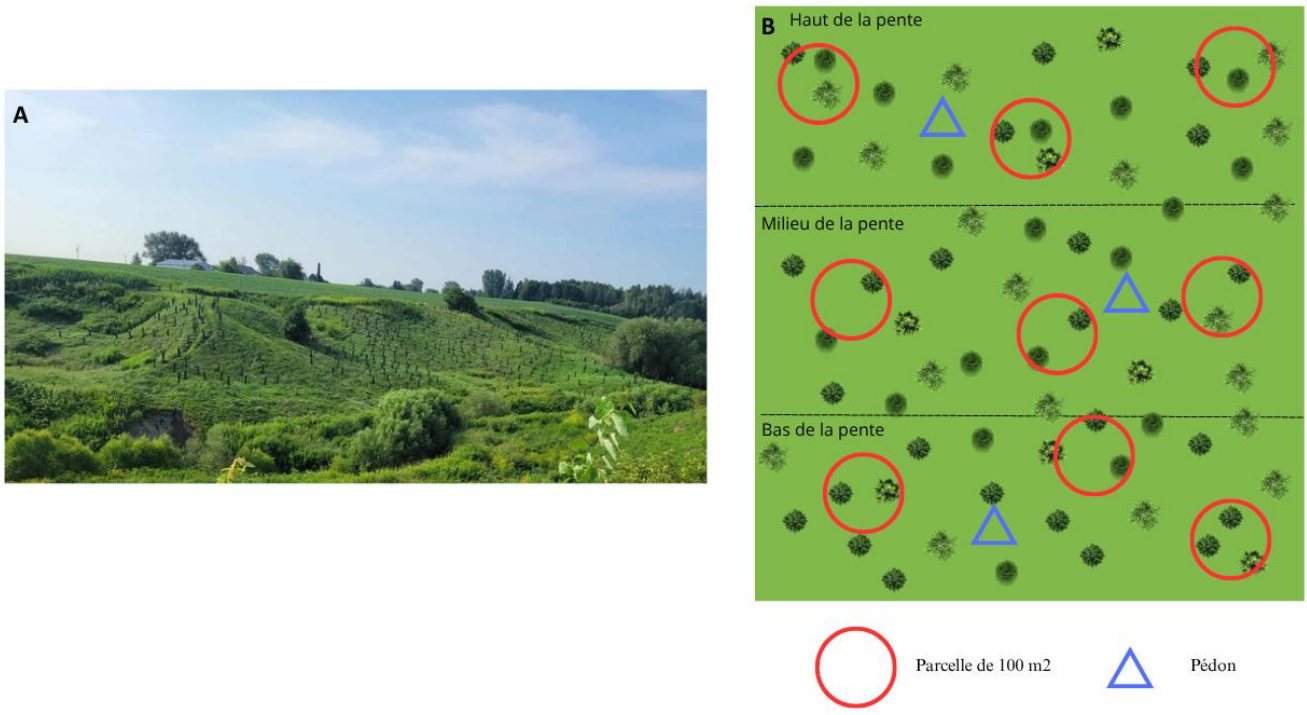

Figure 3. Vue d'une coulée agricole échantillonnée à St-Aimé (A) et disposition des parcelles dans les trois sections typiques d'une coulée agricole : haut, milieu et bas de pente (B).

3.2. Variables mesurées

Pour chacun des sites de l'étude, différents facteurs susceptibles d'influencer la survie et la croissance des arbres ont été recencés (Tableau 2). Ces facteurs ont été regroupés en trois catégories : les facteurs abiotiques, biotiques et techniques.

3.2.1. Facteurs abiotiques

Dans chaque site, trois pédons (50 cm de diamètre x 80 cm de profondeur) ont été réalisés, un dans chacune des trois sections typiques de la coulée : haut, centre et bas de pente. Pour chaque pédon, la présence ou l'absence d'une couche indurée et/ou compactée a été notée. La profondeur de la nappe phréatique ainsi que la profondeur d'enracinement ont été mesurés à l'intérieur du profil. La profondeur des premières mouchetures a également été relevée. La classe de drainage, déterminée à l'aide de la clé d'identification du *Point d'observation écologique* (Saucier *et al.* 1994), ainsi que la classe d'inégalité du sol ont aussi été observées. L'orientation de la pente a été déterminée à l'aide d'une boussole, tandis que son inclinaison a été mesurée l'aide d'un clinomètre Suunto.

Dans chaque parcelle, trois carottes de sol (0-20 cm) ont été prélevées à l'aide d'une tarière manuelle Edelman (ø : 7 cm). Ces carottes ont ensuite été homogénéisées sur le terrain pour former un échantillon composite, puis tamisés en laboratoire à l'aide d'un tamis de 2 mm. La texture (proportions de sable, limon et argile) a été déterminée selon la méthode de l'hydromètre de Bouyoucos (1962). Le pH a été mesuré à partir d'un ratio eau:sol de 2:1.

3.2.2. Facteurs biotiques

La diversité et l'abondance de la végétation spontanée dans les coulées ont été évaluées à l'aide d'un échantillonnage consistant en l'installation de deux quadrats de 1 m^2 par parcelle, placés respectivement à 2 m au nord et à 2 m au sud du centre de la parcelle (Figure 2). La végétation a été classée en quatre catégories : 1) arbustes, 2) phorbes (plantes herbacées non graminoïdes à fleurs), 3) graminoïdes (graminées, carex et joncs), et 4) autres plantes (fougères, lycopodes, mousses et sphaignes). Le pourcentage de recouvrement de chaque catégorie, ainsi que le recouvrement total de la végétation, ont

été estimés visuellement. Enfin, pour chaque arbre inventorié, la présence de signes d'herbivorie, d'insectivorie ainsi que de défauts morphologiques de la tige a été notée.

3.2.3. Facteurs techniques

La distance entre les arbres a été mesurée à l'intérieur de chaque parcelle. Les pratiques de gestion de la végétation spontanée ont été documentées selon deux volets : l'utilisation d'un paillis et le fauchage. Pour le paillis, la présence ou l'absence a été notée, de même que le type utilisé (plastique, biodisque, copeaux de bois ou carton) ainsi que sa superficie. En ce qui concerne le fauchage, les propriétaires ou leurs conseillers ont été interrogés afin de déterminer s'il était pratiqué, ainsi que sa fréquence. Un autre facteur technique considéré était l'utilisation de dispositifs de protection contre l'herbivorie. Deux types de dispositifs ont été observés sur les sites : 1) des spirales protectrices enroulées autour du tronc pour limiter les dommages causés par les rongeurs, et 2) des protecteurs individuels installés autour des arbres pour pour prévenir le broutement par les cervidés. Pour chacun de ces dispositifs, leur présence ou absence a été notée, de même que la qualité ou l'efficacité apparente de leur installation.

Tableau 2. Facteurs analysés en relation avec la survie et la dimension des arbres dans différentes coulées agricoles.

Facteurs abiotiques	**Facteurs biotiques**	**Facteurs techniques**
Texture du sol	Recouvrement de la végétation spontanée (%)	Distance entre les arbres
pH du sol	Recouvrement des arbustes spontanés (%)	Préparation du sol (avec ou sans)
Inclinaison de la pente (%)	Recouvrement des phorbes spontannées (%)	Type de paillis
Localisation sur la pente (haut centre ou bas)	Reconvrement des graminoides spontannées (%)	Fauchage de la végétation spontanée (avec ou sans)
Année de plantation	Recouvrement des autres plantes spontannées (%)	Présence/absence de protection contre l'herbivorie
Exposition de la pente	Présence/ Absence de signe d'herbivorie	Conformité de l'installation du protecteur contre l'herbivorie
Présence/absence d'une couche indurée	Présence/Absence de signe d'insectivories	Saison de plantation (printemps ou automne)
Présence/absence d'une couche compactée	Présence/ Absence de défaut sur les tiges	
Pronfondeur de la nappe phréatique		
Classe de drainage[1]		
Classe d'inégalité[2]		
Profondeur d'enracinement		

1 : Très rapide, rapide, bon, modérément bon, imparfait, mauvais, ou très mauvais (déterminé dans l'outil Info-sols ou à l'aide d'un pédon et de la clé d'identification dans le *Point d'observation écologique*).
2 : Très égale (1), légèrement inégal (2), inégal (3), très inégal (4), extrémement inégal (5).

3.2.4. Survie et dimensions des arbres

Pour qualifier l'état des arbres, un indice de survie a été utilisé, classant les individus en trois catégories : 1) vigoureux, 2) en état critique et 3) mort. Cet indice permet d'évaluer l'état de santé général des plantations. Le nombre d'arbres morts a été estimé en tenant compte de la densité initiale de plantation. Dans les cas où les plantations ne présentaient pas un espacement régulier, la présence de paillis sans arbre a été utilisée pour estimer indirectement la mortalité.

La hauteur de chaque arbre présent dans les parcelles inventoriées a été mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer pour les individus de moins de 2 m, ou d'une perche de mesure à lecture digitale (Sokkia) pour ceux dépassant 2 m de hauteur. Le diamètre à la hauteur du sol a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Pour chaque arbre, le volume conique a été calculé selon la formule suivante :

$$V = 1/3H\pi r^2$$

où H est la hauteur de l'arbre et r le rayon à la base (moitié du diamètre mesuré).

3.3. Analyses statistiques

Pour la survie, un régression logistique mixte avec une distribution binomiale a été réalisée pour chaque variable explicative (Tableau 3). Les données individuelles des arbres ont ainsi été utilisées et regroupées en deux classes : arbres vivants (V) versus arbres en état critique ou morts (M). Chaque modèle était de la forme suivante : *Survie ~ Variable explicative + (1|Site/Parcelle)*
où la variable survie est binaire (M = 0, V = 1) et où des effets aléatoires nichés sont utilisés afin de tenir compte des corrélations spatiales intra-site et intra-parcelle.

Pour le volume conique, les analyses ont été réalisées séparément pour chaque espèce comptant un minimum de 80 individus vivants ou en état critique (épinette blanche, chêne à gros fruits, mélèze, érable rouge, chêne bicolore, érable à sucre et chêne rouge), et pour chacune des variables explicatives pertinentes (Annexe A). Une transformation logarithmique a été appliquée afin de normaliser la distribution du volume pour chaque espèce. Chaque modèle consistait en une régression linéaire mixte de la forme suivante : *Volume conique ~ Âge + Variable explicative + (1|Site/Parcelle)*

où l'âge de la plantation était inclus comme variable confondante dans chacun des modèles et où les effets aléatoires correspondaient à ceux décrits précédemment.

Nous avons aussi testé les différences de volume conique entre 15 espèces en contrôlant pour l'âge. Chacune de ces espèces comptait un minimum de 30 individus vivants ou en état critique. Le modèle était de la forme suivante : *Volume conique ~ Âge + Espèce + (1|Site/Parcelle)*

où l'âge et les effets aléatoires correspondaient à ceux décrits précédemment et où l'espèce était traitée comme une variable catégorique. L'exploration de l'interaction entre l'âge et l'espèce s'est avérée impossible, plusieurs espèces présentant une forte concentration des observations à un âge donné, ce qui ne permettait pas un ajustement adéquat de la relation âge-croissance pour chacune d'entre elles.

Des comparaisons entre espèces ont aussi été réalisées pour la proportion d'individus (i.e. vivants ou en état critique; les individus morts ayant été exclus) présentant : 1) des défauts morphologiques, 2) une descente de cime, 3) des signes d'herbivorie ou 4) des dommages liés aux insectes. Une régression mixte avec une distribution binomiale a été ajustée séparément pour chacune de ces quatre catégories. Seules les espèces comptant un minimum de 30 individus ont été retenues pour ces analyses. Les différences entre espèces ont été testées à l'aide du modèle suivant : *État ~ Espèce + (1|Site/Parcelle)*

où *État* est binaire (0 = non affecté, 1 = affecté), les effets aléatoires correspondant à ceux décrits précédemment et où l'espèce est traitée comme une variable catégorique.

La significativité de chaque variable explicative a été évaluée à l'aide d'un test du rapport de vraisemblance comparant le modèle complet au modèle réduit excluant la variable d'intérêt. Lorsqu'une variable catégorique comportait plus de deux niveaux et s'avérait significative, des comparaisons multiples ont été effectuées avec une correction de Tukey. Toutes les analyses ont été réalisées dans R (version 4.2.3; R Core Team 2023).

4. RÉSULTATS

4.1. Caractéristiques biophysiques des coulées agricoles

Les coulées agricoles inventoriées présentaient une pente moyenne de 23,6 % (Annexe B, Tableau S2). La majorité des sites (68 %) avaient un drainage variant d'imparfait à très mauvais, tandis que 22 % présentaient un drainage bon à modérément bon. Le pH moyen du sol (eau) était de 5,8. Les teneurs moyennes en sable et en argile étaient respectivement de 18,5 % et 42 %. Au total, 64 % des sites (16/25) présentaient une texture argileuse (≥ 35 % d'argile). Le contenu en sable était généralement plus élevé en haut de pente, alors que les teneurs en limon et en argile augmentaient vers le milieu et le bas de pente (Annexe C, Figure S1A–C). L'enracinement observé dans les pédons était également plus profond en bas de pente qu'en haut de pente (Annexe C, Figure S1D). Une nappe phréatique a été observée uniquement dans certains pédons situés en bas de pente (3/15) et en haut de pente (2/17), alors qu'aucune observation n'a été rapportée en milieu de pente (0/18). Les recouvrements moyens de la végétation herbacée et de la strate arbustive spontanée étaient respectivement de 61,1 % et 1,8 %.

4.2. Taux de survie

Le taux de survie moyen des arbres plantés sur l'ensemble des 25 sites étudiés était de 73,4 % (*N* = 1871). Parmi les 30 variables explicatives testées pour expliquer le taux de survie des arbres, seulement cinq se sont révélées significatives : l'âge de la plantation, le type d'arbre, l'abondance d'arbustes, la présence de fauchage et le type de paillis (Tableau 3).

Une relation positive a été observée entre le taux de survie des arbres et l'abondance d'arbustes régénérés naturellement (Figure 4A). Le taux de survie des arbres feuillus (69,9 %) était légèrement supérieur à celui des conifères (68,5%), mais ne différait pas de celui des arbustes (63,3 %) (Figure 4B). Le fauchage de la végétation concurrente était également associé à un taux de survie plus élevé : les arbres situés dans des zones fauchées présentaient un taux de survie de 72,3%, contre 53,9 % en l'absence de fauchage (Figure 4C). La majorité des arbres inventoriés ont été plantés avec un paillis de plastique (Figure 4D), tandis qu'une proportion plus faible l'a été avec d'autres types de paillis. Parmi ces derniers, les individus plantés avec un biodisque présentaient le taux de survie le plus faible.

Tableau 3. Résultats des régressions logistiques expliquant le taux de survie des arbres. Le nombre d'observations (N), le coefficient (uniquement pour les variables continues ou à deux modalités), le rapport de cotes (Odds ratio, le cas échéant) et la valeur de *P* du test du rapport de vraisemblance sont montrés pour chaque variable explicative. Les résultats significatifs sont indiqués en gras (* P < 0,05; ** P < 0,01).

Catégorie	Variable explicative	*N*	Coefficient	Odds ratio	Valeur de *P*
	Âge de la plantation	**1871**	**0.685**	**1.984**	**0.027 ***
	pH du sol	1860	-0.155	0.856	0.313
	Contenu en sable du sol	1860	0.053	1.054	0.303
	Contenu en limon du sol	1860	0.005	1.005	0.556
	Contenu en argile du sol	1860	-0.008	0.992	0.218
	Pente	1367	-0.033	0.968	0.135
Facteurs abiotiques	Exposition	1367			0.268
	Position dans la pente	1871			0.817
	Présence d'une couche indurée	1444	-0.087	0.917	0.851
	Présence de compaction	1444	-0.225	0.799	0.339
	Présence de nappe	1444	-0.051	0.950	0.926
	Profondeur de nappe	72	0.005	1.005	0.558
	Classe de drainage	1444			0.436
	Type d'arbre (feuillu, résineux ou arbuste)	**1721**			**0.013 ***
	Composition (feuillus, mixte ou résineux)	1871			0.479
	Présence d'arbustes plantés	1672	-0.134	0.875	0.505
Facteurs biotiques	**Abondance d'arbustes**	**1815**	**0.186**	**1.204**	**0.032 ***
	Abondance de phorbes	1815	0.004	1.004	0.901
	Abondance de graminoïdes	1815	-0.001	0.999	0.722
	Abondance autres	1815	-0.006	0.994	0.755
	Abondance totale végétation	1815	0.001	1.001	0.867
	Profondeur d'enracinement	1444	0.000	1.000	0.973
	Distance entre les plants	1871	0.659	1.933	0.213
	Présence de préparation du sol	1871	-0.123	0.884	0.838
	Présence de fauchage	**1871**	**0.823**	**2.277**	**0.049 ***
Facteurs techniques	Présence de paillis	1871	-0.763	0.466	0.151
	Type de paillis	**1871**			**0.006 ****
	Présence de protecteur[1]	1185	-0.063	0.939	0.896
	Défaut d'installation du protecteur[1]	1078	-0.466	0.628	0.145
	Saison de plantation	1335	-0.445	0.641	0.668

[1] Seulement sur les feuillus et seulement sur les sites avec protecteurs pour les défauts d'installation.

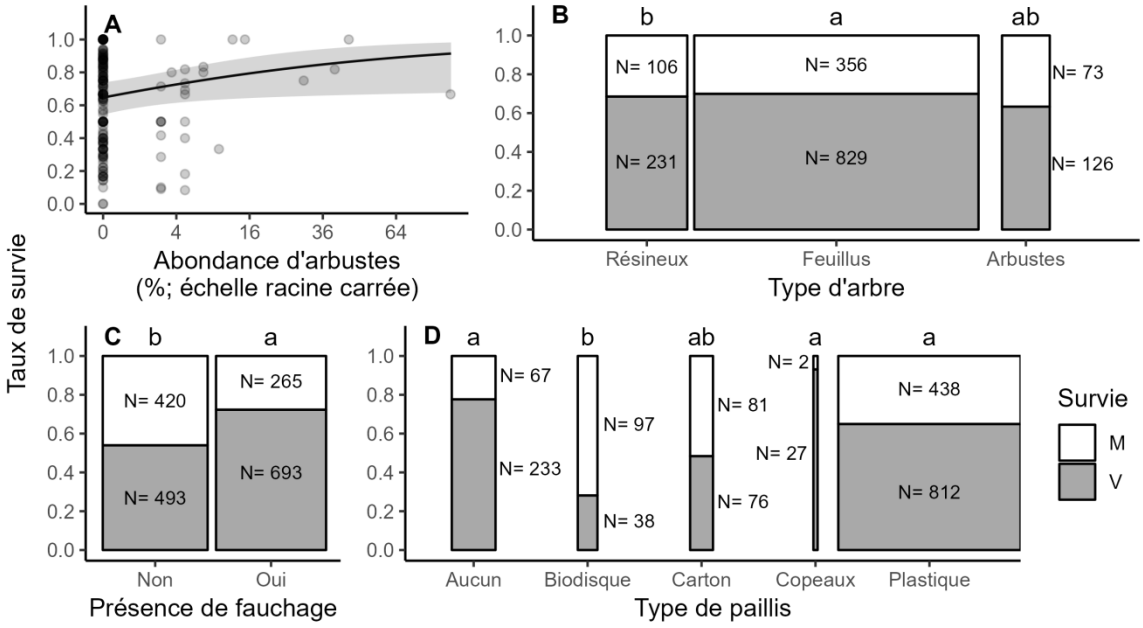

Figure 4. Taux de survie en fonction de l'abondance d'arbustes (A), du type d'arbre (B), de la présence de fauchage (C) et du type de paillis (D). Les points représentent le taux de survie par parcelle et la courbe représente la prédiction du modèle avec ses intervalles de confiance à 95 % (A). La taille des barres correspond au nombre d'observations pour chaque catégorie ainsi qu'à la proportion d'arbres morts ou en état critique (M, en blanc) versus vivants (V, en gris). Des lettres différentes indiquent des différences significatives (comparaisons multiples avec correction de Tukey pour B et D; $P < 0,05$).

4.3. Croissance des arbres

Une relation positive a été observée entre le volume conique et l'âge de la plantation (Figure 5A). En considérant uniquemment les espèces comptant au moins 30 individus et en contrôlant pour l'âge de la plantation, les espèces les plus productives en termes de volume conique étaient le pin rouge, les mélèzes, l'érable argenté et les peupliers. À l'inverse, le caryer cordiforme présentait la croissance la plus faible. Le chêne rouge et le chêne à gros fruits présentaient une croissance supérieure à celle du chêne bicolore. Les sections suivantes présentent, pour chaque espèce d'arbre comptant au moins 80 individus vivants ou en état critique dans la base de données, les facteurs ayant un effet significatif sur le volume conique (Tableau 4).

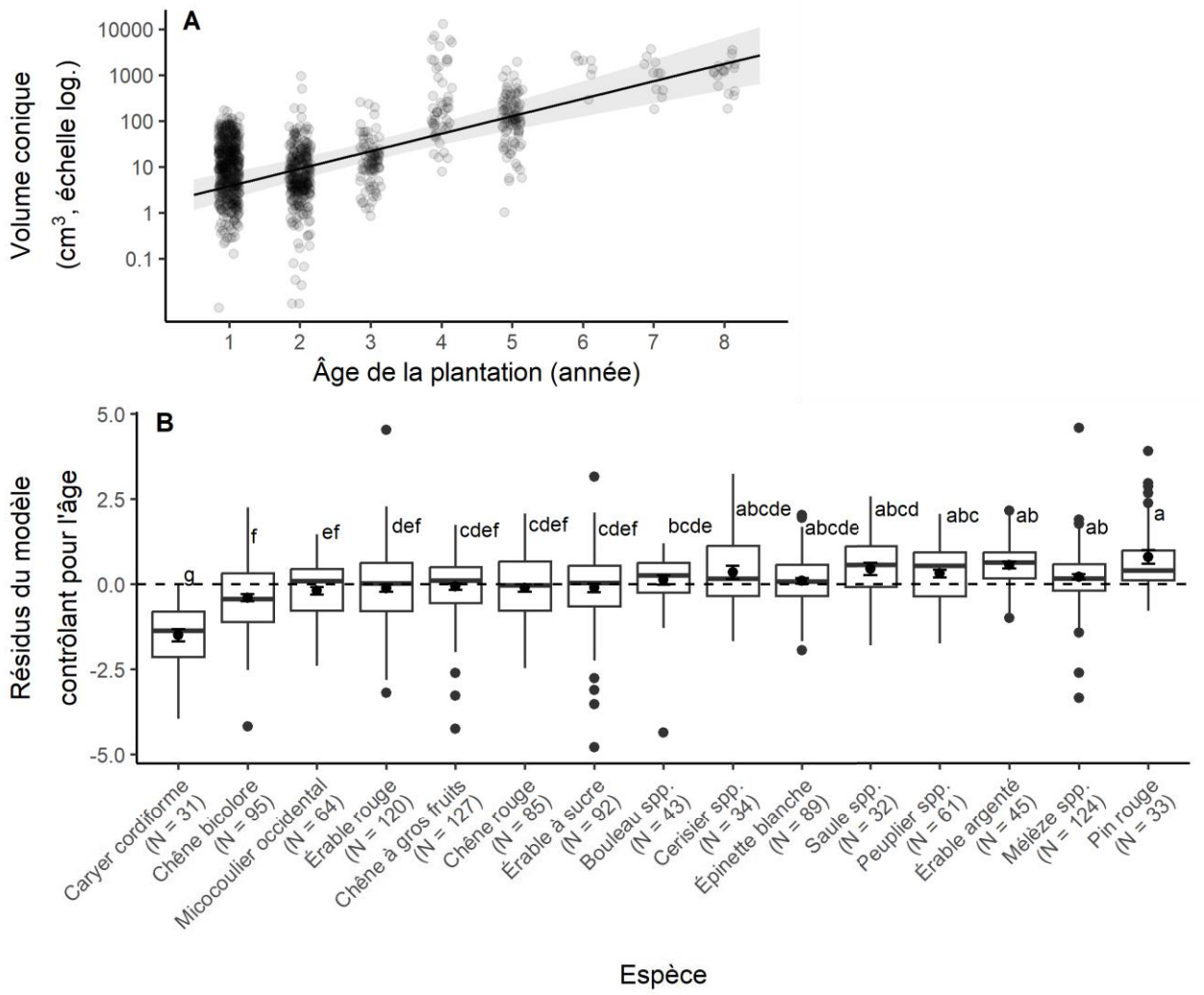

Figure 5. Volume conique de toutes les espèces ayant au minimum 30 individus vivants ou en état critique en fonction de l'âge (A) et résidus du modèle contrôlant pour l'âge en fonction de l'espèce (B). Pour A, chaque point représente un arbre. La courbe et ses intervalles de confiance à 95 % représentent la prédiction du modèle. Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation. Pour B, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0,05$).

Tableau 4. Résultats des régressions linéaires mixtes expliquant le volume conique pour chaque espèce d'arbre comptant au moins 80 individus vivants ou en état critique dans la base de données. Le nombre d'observations (*N*), les coefficients de détermination marginaux (effets fixes seulement) et conditionnels (effets fixes et aléatoires), ainsi que la valeur de *P* du test de rapport de vraisemblance sont montrés pour chaque variable explicative. Seules les variables marginalement significatives (. $P < 0,1$) ou significatives (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$) sont montrées.

Espèce	Variable explicative	N	R^2 marg.	R^2 cond.	Valeur de *P*
Épinette blanche	Âge de la plantation	89	0.71	0.91	0.000 ***
	Type de paillis	87	0.79	0.91	0.062 .
Chêne à gros fruits	Âge de la plantation	127	0.50	0.90	0.001 ***
	Pente	76	0.29	0.77	0.019 *
	Exposition	76	0.41	0.69	0.028 *
	Position dans la pente	127	0.53	0.91	0.07 .
	Présence de protecteurs au site	127	0.61	0.88	0.002 **
Mélèze	Position dans la pente	124	0.05	0.57	0.025 *
	Défaut d'installation du protecteur	36	0.17	0.44	0.031 *
	Présence de protecteurs au site	124	0.40	0.53	0.006 **
	Présence de compaction	93	0.37	0.43	0.006 **
	Profondeur d'enracinement	93	0.12	0.40	0.065 .
	Pente	93	0.11	0.56	0.021 *
	Exposition	93	0.52	0.52	0.003 **
Érable rouge	Défaut d'installation du protecteur	115	0.10	0.59	0.02 *
	Présence de fauchage	120	0.22	0.71	0.019 *
	Présence de protecteurs au site	120	0.24	0.67	0.001 **
	Pente	103	0.25	0.63	0.028 *
Chêne bicolore	Âge de la plantation	95	0.21	0.76	0.005 **
	Présence de fauchage	95	0.22	0.75	0.099 .
	Abondance totale végétation	94	0.24	0.77	0.056 .
	Exposition	82	0.39	0.72	0.076 .
Érable à sucre	Âge de la plantation	92	0.25	0.49	0.002 **
	Présence de fauchage	92	0.38	0.49	0.012 *
	Présence de paillis et de protecteurs	92	0.42	0.54	0.021 *
	Type de paillis	92	0.42	0.55	0.066 .
	Position dans la pente	92	0.30	0.47	0.051 .
	Exposition	68	0.28	0.37	0.055 .
Chêne rouge	Âge de la plantation	85	0.45	0.75	0.000 ***
	Présence de fauchage	85	0.56	0.74	0.002 **
	Abondance de phorbes	84	0.57	0.76	0.004 **
	Abondance de graminoïdes	84	0.53	0.76	0.015 *
	Classe de drainage	63	0.49	0.70	0.047 *
	Présence d'arbustes plantés	85	0.51	0.75	0.026 *
	Contenu en argile du sol	85	0.50	0.74	0.081 .
	Présence de protecteurs au site	85	0.53	0.74	0.043 *

4.3.1. Épinette blanche

Une relation positive a été observée entre le volume conique et l'âge de la plantation (Figure 6A). Les paillis de type biodisque se sont révélés moins performants que les paillis de plastique : les arbres plantés avec un paillis de plastique présentaient un volume conique supérieur à ceux plantés avec un biodisque (Figure 6B). Aucune différence significative n'a toutefois été détectée entre les arbres plantés sans paillis et ceux plantés avec paillis de plastique.

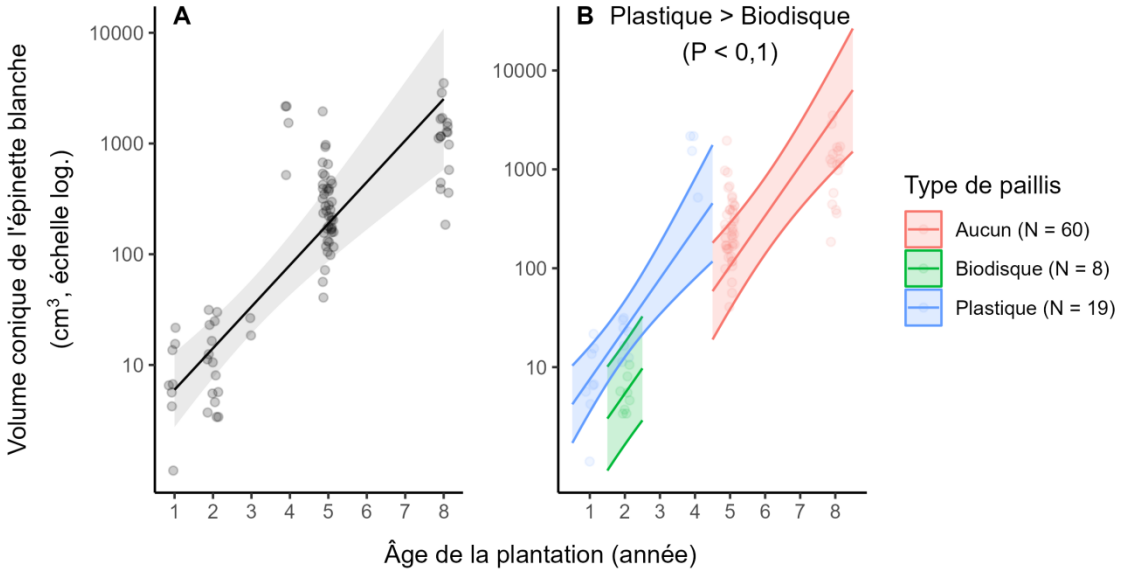

Figure 6. Volume conique de l'épinette blanche en fonction de l'âge (A) et du type de paillis utilisé (B). Chaque point représente un arbre. Les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Pour B, les différences entre catégories proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey. Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation.

4.3.2. Chêne à gros fruits

Une relation positive a été observée entre le volume conique du chêne à gros fruit et l'âge de la plantation (Figure 7A). Les individus situés en bas de pente présentaient un volume conique supérieur à ceux localisés en haut de pente, tandis que ceux situés au milieu de la pente ne différaient pas significativement des autres positions topographiques (Figure 7B). La croissance diminuait également avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente (Figure 7C). Les arbres plantés sur le flanc ouest affichaient une croissance supérieure à ceux exposés au sud, alors qu'aucune différence significative n'a été observée pour les

orientations nord et sud-ouest (Figure 7D). La présence de protecteurs contre l'herbivorie avait un effet significatif et positif sur le volume conique (Figure 7E).

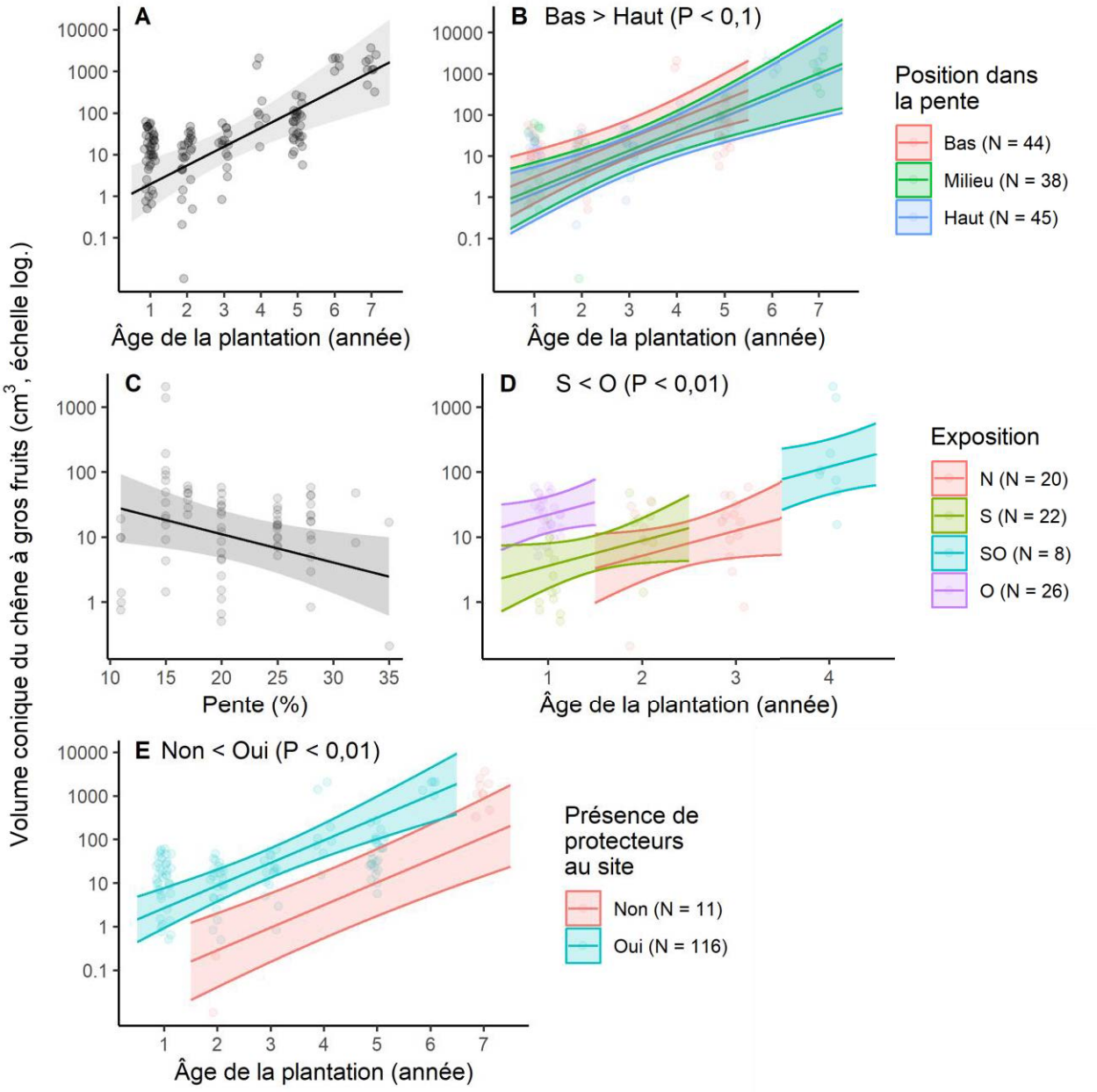

Figure 7. Volume conique du chêne à gros fruits en fonction de l'âge (A), de la position dans la pente (B), de l'inclinaison de la pente (C), de l'exposition de la pente (D) et de la présence de protecteurs sur le site (E). Chaque point représente un arbre. Les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Les différences observées pour B et D proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$) . Les points ont été décalés aléatoirement en abscisse autour de chaque valeur discrète d'âge pour faciliter la visualisation, sauf pour C.

4.3.3. Mélèzes

Les mélèzes (mélèze laricin et mélèze hybride) présentaient une croissance supérieure lorsqu'ils étaient plantés en bas ou en haut de pente, avec un volume conique plus élevé dans ces deux positions comparativment aux arbres situés au milieu de la pente (Figure 8A). La présence d'un défaut d'installation des protecteurs était associée à une croissance accrue (Figure 8B). Cependant, ce résultat doit être interprété avec prudence en raison du faible nombre d'individus concernés (N = 3). De manière générale, la présence de protecteurs, qu'ils présentent ou non un défaut d'installation, était associée à une augmentation du volume conique (Figure 8C). Une relation positive a également été observée entre le volume conique et la profondeur d'enracinement : le voulme conique des mélèzes augmentait avec l'augmentation de la profondeur d'enracinement (Figure 8D). À l'inverse, le volume conique diminuait avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente (Figure 8E). La présence de compaction du sol influençait aussi la croissance des arbres. Les mélèzes plantés dans des sols non compactés avaient un volume conique supérieur à celui des individus établis dans des sols compactés (Figure 8F). Enfin, l'orientation de la pente avait un effet significatif sur la dimension des arbres : les arbres plantés sur des pentes orientées vers le sud et le sud-est présentaient un volume conique supérieur à ceux orientés vers le sud-ouest, le nord ou l'ouest (Figure 8G).

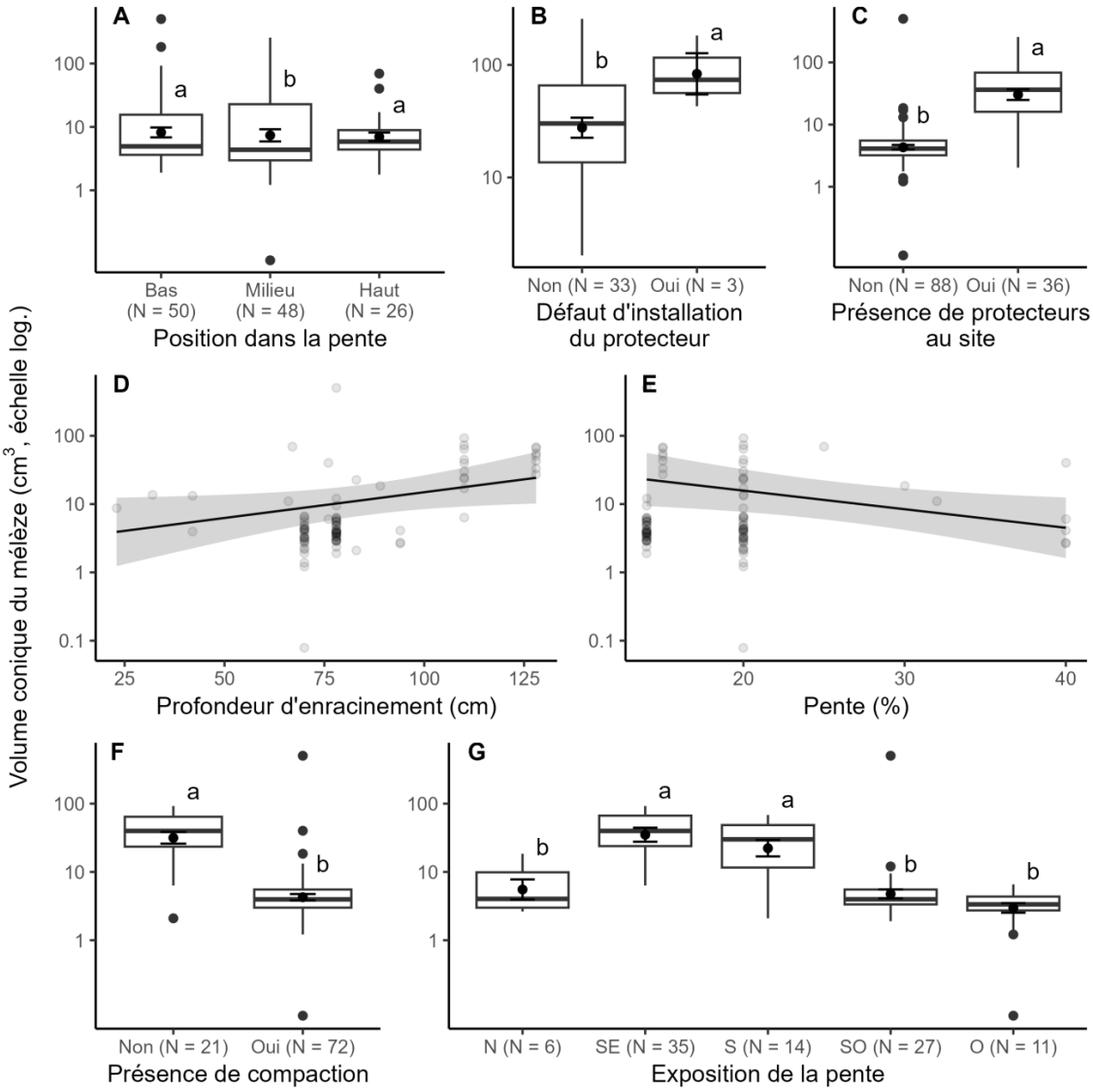

Figure 8. Volume conique du mélèze en fonction de la position dans la pente (A), de la présence d'un défaut d'installation du protecteur (B), de la présence de protecteurs sur le site (C), de la profondeur d'enracinement (D), de l'inclinaison de la pente (E), de la présence de compaction du sol (F) et de l'exposition de la pente (G). Pour D et E, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Les différences observées pour A et G proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$). Les boîtes et la ligne foncée représentent respectivement l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie.

4.3.4. Érable rouge

Chez l'érable rouge, les individus munis d'un protecteur correctemment installé présentaient un volume conique supérieur à ceux dont le protecteur comportait un défaut d'installation (Figure 9A). Comme observé chez le mélèze, la croissance diminuait avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente (Figure 9B). Le volume conique était également plus élevé sur les sites où un fauchage avait été réalisé, comparativement aux sites non fauchés (Figure 9C). Enfin, la présence d'un protecteur semblait aussi favoriser la croissance des arbres (Figure 9D), bien que cette tendance doive être interprétée avec prudence en raison du faible nombre d'individus sans protecteur.

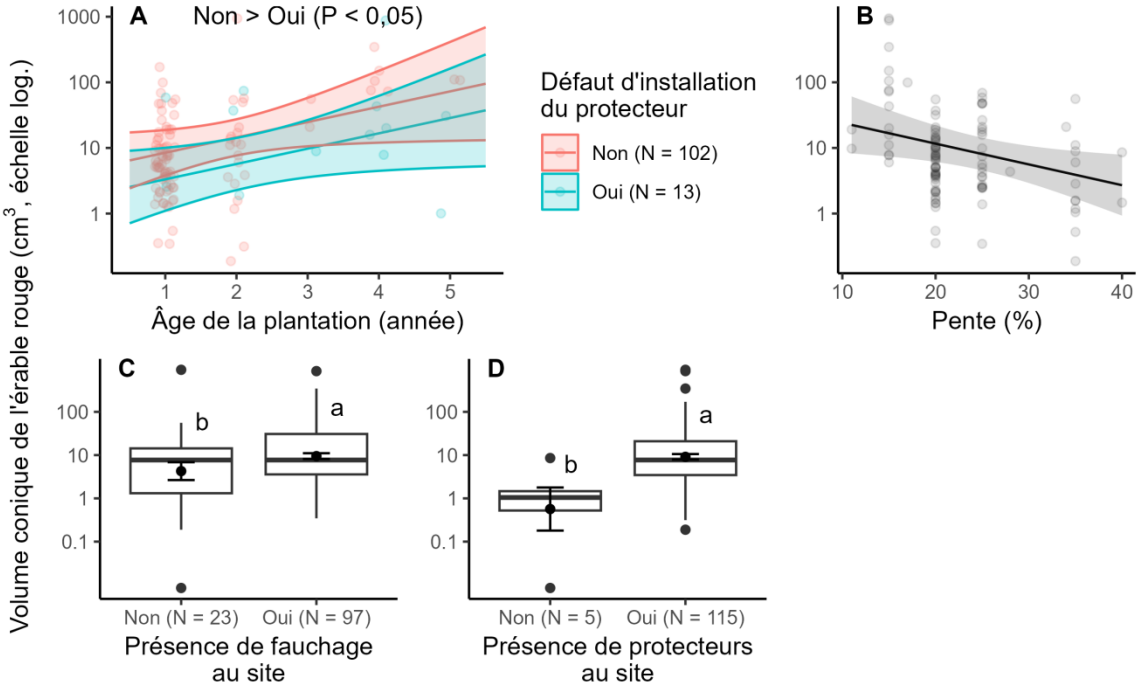

Figure 9. Volume conique de l'érable rouge en fonction d'un défaut d'installation du protecteur (A), de l'inclinaison de la pente (B), de la présence de fauchage sur le site (C) et de la présence de protecteurs sur le site (D). Pour A et B, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions de chaque modèle. Pour C et D, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie.

4.3.5. Chêne bicolore

Chez le chêne bicolore, une relation positive a été observée entre le volume conique et l'âge de la plantation (Figure 10A). La présence de fauchage était associée à une croissance supérieure comparativement aux sites sans fauchage (Figure 10B). À l'inverse, une forte abondance de végétation compétitrice était associée à une diminution du volume conique (Figure 10C). Enfin, les arbres plantés sur des pentes orientées vers l'ouest présentaient une croissance plus élevée que ceux plantés au nord, tandis qu'aucune différence significative n'a été observée pour les orientations sud et sud-ouest (Figure 10D).

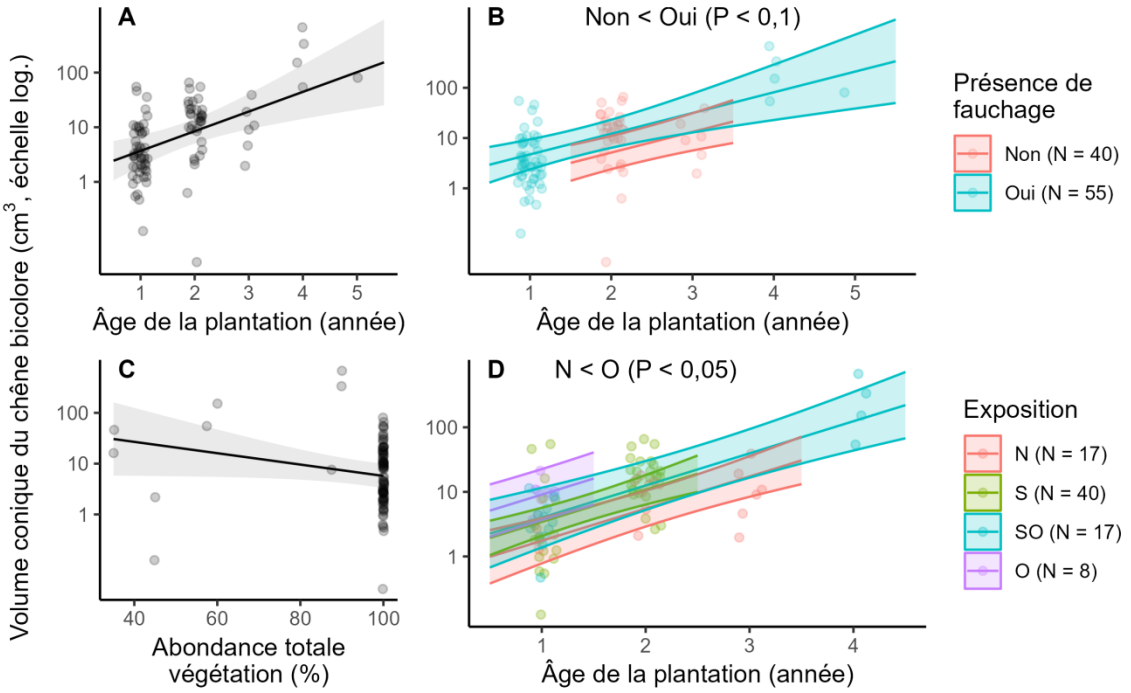

Figure 10. Volume conique du chêne bicolore en fonction de l'âge (A), de la présence de fauchage sur le site (B), de l'abondance totale de végétation (C) et de l'exposition de la pente (D). Chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions de chaque modèle. Les différences observées pour D proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$).

4.3.6. Érable à sucre

Chez l'érable à sucre, une relation positive a été observée entre le volume conique et l'âge de la plantation (Figure 11A). L'utilisation de paillis, qu'il soit en carton ou en plastique, était associée à un volume conique supérieur comparativement à l'absence de paillis (Figure 11B). Les érables à sucre plantés en haut de pente

présentaient une croissance supérieure à ceux situés au milieu de la pente, tandis qu'aucune différence significative n'a été observée avec les individus plantés en bas de pente (Figure 11C). Le fauchage était également associé à une croissance accrue, avec un volume conique plus élevé sur les sites fauchés que sur les sites non fauchés (Figure 11D). La présence combinée de paillis et de protecteurs contribuait également à améliorer la croissance comparativement aux sites dépourvus de ces aménagements (Figure 11E). Enfin, les arbres orientés vers l'ouest présentaient un volume conique supérieur à ceux orientés sud-ouest, alors qu'aucune différence significative n'a été détectée pour les orientations nord et sud (Figure 11F).

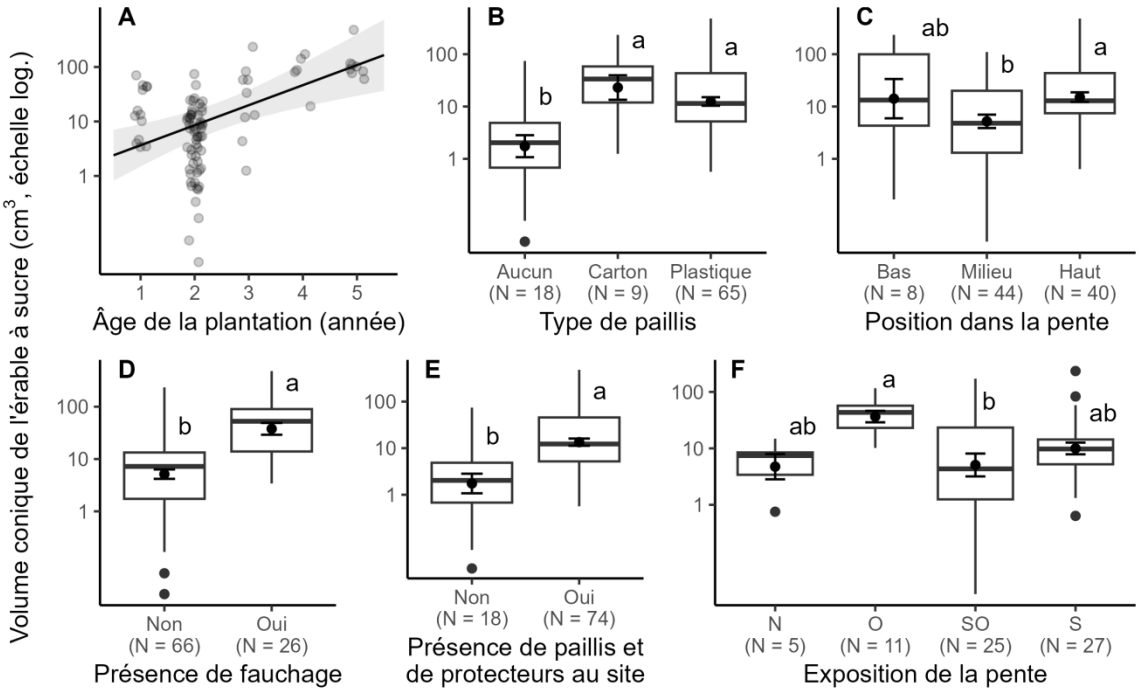

Figure 11. Volume conique de l'érable à sucre en fonction de l'âge (A), du type de paillis (B), de la position dans la pente (C), de la présence de fauchage sur le site (D), de la présence combinée de paillis et de protecteurs sur le site (E) et de l'exposition de la pente (F). Pour A, chaque point représente un arbre, et la pente et ses intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions du modèle. Pour B à F, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie. Les différences observées pour B, C et F proviennent de comparaisons multiples avec correction de Tukey ($P < 0,05$).

4.3.7. Chêne rouge

Chez le chêne rouge, une relation positive a été observée entre le volume conique et l'âge de la plantation (Figure 12A). L'abondance de phorbes exerçait un effet négatif : plus le pourcentage de phorbes était élevé, plus le volume conique diminuait (Figure 12B). À l'inverse, une légère tendance positive a été observée avec l'augmentation du recouvrement en graminoïdes, le volume conique augmentant faiblement avec leur proportion (Figure 12C). Par ailleurs, la texture du sol influençait la croissance : une teneur plus élevée en argile était associée à une augmentation du volume conique (Figure 12D). Les sites fauchés présentaient également un volume conique supérieur à ceux non fauchés (Figure 12E). Concernant la classe de drainage, les arbres implantés sur des sols classés « drainage modéré » (classe 3) affichaient un volume conique inférieur à ceux classés « drainage imparfait » (classe 4) (Figure 12F). La co-implantation avec des arbustes a favorisé la croissance, mais le faible effectif associé à cette situation invite à la prudence dans l'interprétation de ce résultat (Figure 12G). Enfin, la présence de protecteurs sur le site était associée à une croissance accrue : les arbres bénéficiant d'un protecteur présentant un volume conique supérieur à ceux sans protecteur (Figure 12H).

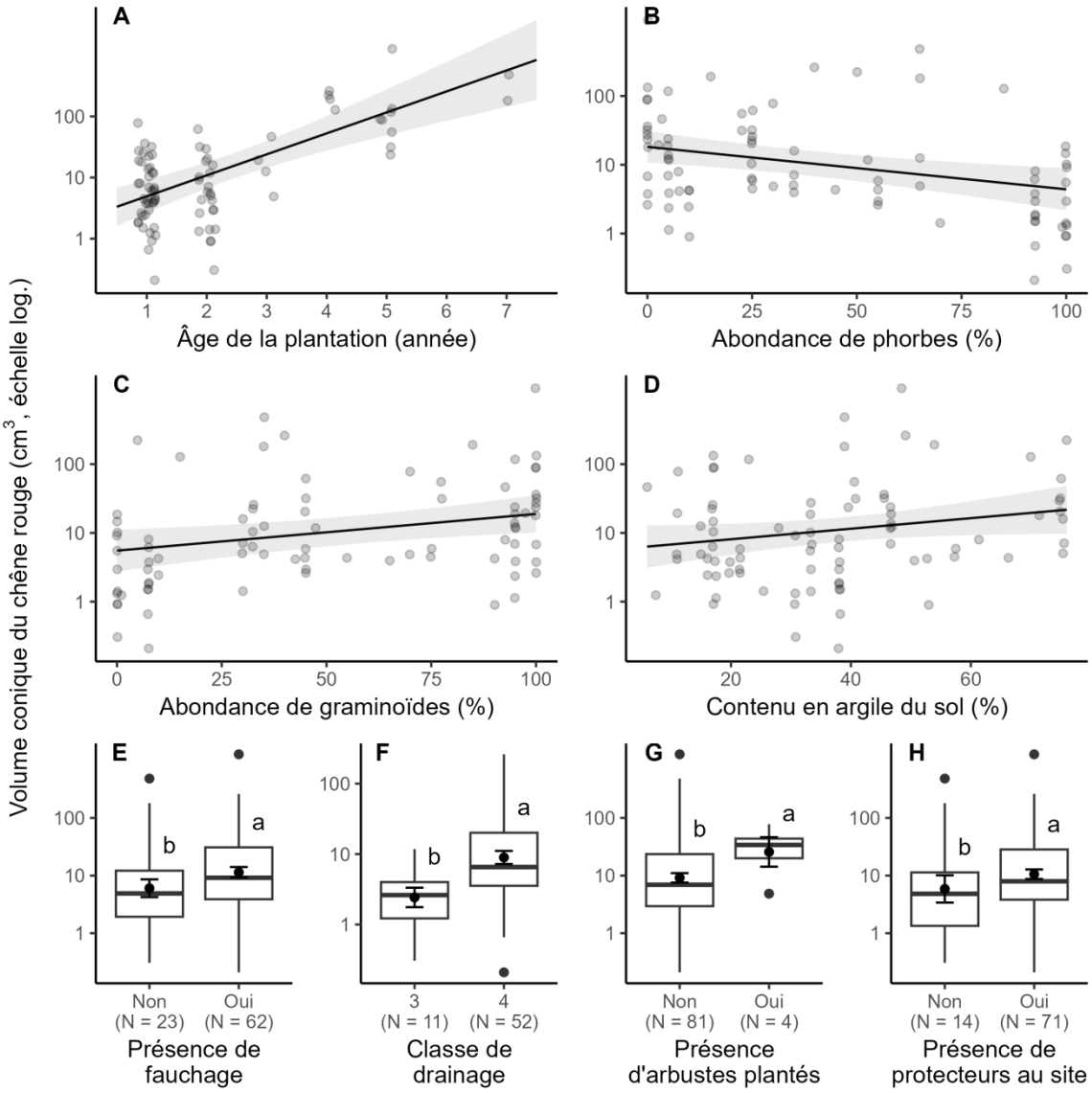

Figure 12. Volume conique du chêne rouge en fonction de l'âge (A), de l'abondance de phorbes (B), de l'abondance de graminoïdes (C), du contenu en argile du sol (D), de la présence de fauchage sur le site (E), de la classe de drainage (F), de la présence d'arbustes plantés (G) et de la présence de protecteurs sur le site (H). Pour A à D, chaque point représente un arbre, et les pentes et leurs intervalles de confiance à 95 % représentent les prédictions des modèles. Pour E à H, les boîtes et la ligne foncée représentent l'étendue interquartile (EI) et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs situées à moins de 1 EI de la boîte et les points au-delà de ce seuil représentent les valeurs aberrantes. Les points avec barres d'erreur représentent la moyenne et l'erreur-type pour chaque catégorie.

4.4. Défauts, descente de cime, herbivorie et insectes

Le groupe des mélèzes présentait la plus forte proportion d'arbres présentant des défauts, tandis que le chêne bicolore, le chêne à gros fruits, l'érable rouge et l'érable à sucre affichaient les proportions les plus faibles, sans différence significative entre les autres espèces (Figure 13A). Concernant la descente de cime,

l'érable rouge et le chêne bicolore étaient les plus affectés, alors que le mélèze présentait les plus faibles proportions d'individus touchés, sans différence notable pour les autres espèces (Figure 13B). Pour l'herbivorie par les mammifères, l'érable argenté était l'espèce la plus affectée, tandis que le chêne à gros fruits et le mélèze étaient les moins touchés (Figure 13C). Enfin, la proportion d'arbres affectés par les insectes ne variait pas significativement entre les espèces (Figure 13D).

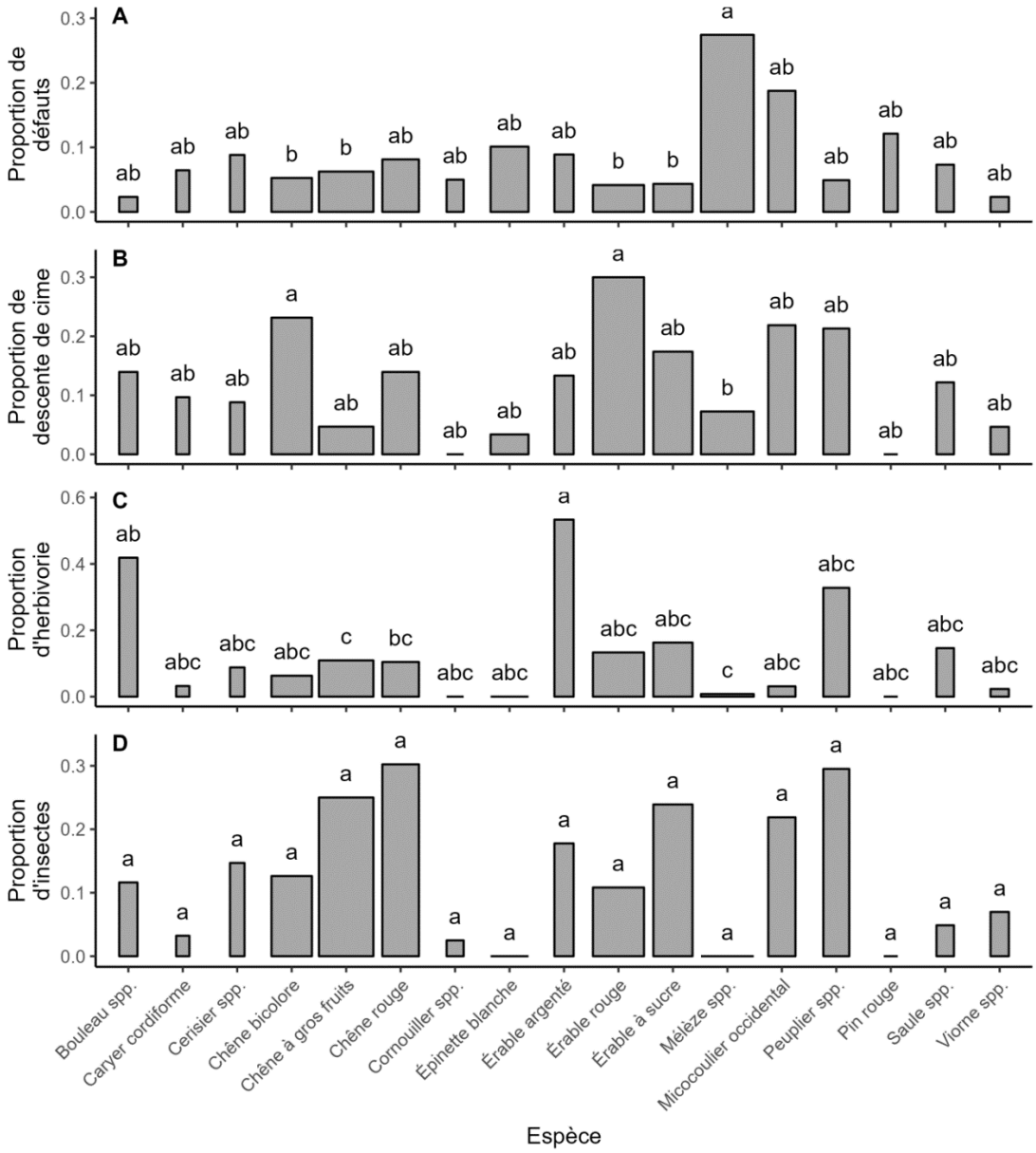

Figure 13. Proportion des arbres, pour chaque espèce, présentant un défaut (A), une descente de cime (B), des signes d'herbivorie (C) et des dommages causés par des insectes (D). La largeur des colonnes est directement proportionnelle au nombre d'observations pour chaque espèce (31 individus pour le caryer cordiforme et 128 pour le chêne à gros fruits). Des lettres différentes indiquent des différences significatives (comparaisons multiples avec correction de Tukey; $P < 0,05$).

4.5. Indices de biodiversité

La richesse spécifique et l'indice de diversité de Shannon des espèces d'arbres plantées augmentaient significativement avec l'année de plantation. Ainsi, une légère augmentation de la diversité des plantations s'est produite au cours du temps, bien que cette tendance demeure faible (R^2 très faibles), et ce malgré la courte période considérée.

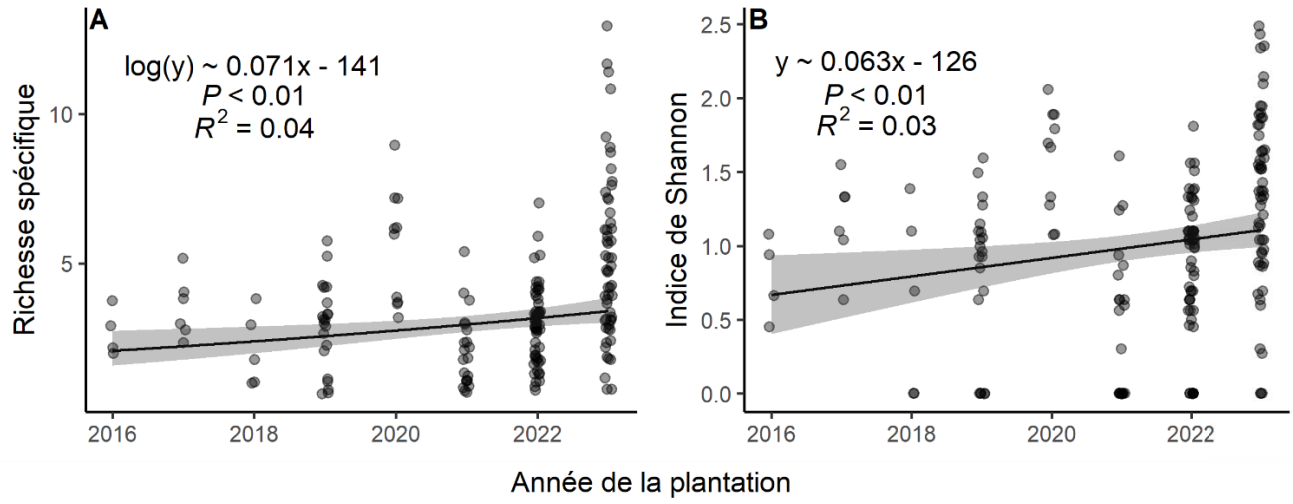

Figure 14. Richesse spécifique (A) et indice de diversité de Shannon (B) des espèces d'arbres plantées en fonction de l'année de plantation. Pour chaque indice de diversité, l'équation de la régression linéaire, la pente, l'intervalle de confiance à 95 %, la valeur de *P* et le coefficient de détermination sont présentés.

5. DISCUSSION

Plusieurs études se sont intéressées à étudier l'établissement des arbres dans différents contextes agricoles, notamment sur des terres en friche issues d'anciennes parcelles cultivées et dans des systèmes agroforestiers (e.g. St-Denis *et al.* 2017; St-Denis *et al.* 2018; Mathieu *et al.* 2024). Toutefois, à notre connaissance, aucune étude n'a spécifiquemment évalué le succès d'établissement de différentes espèces d'arbres dans le contexte particulier des coulées agricoles, et ce, en conditions réelles d'implantation. Or, les coulées agricoles se distinguent fortemment de ces contextes, généralement caractérisés par des terrains plats, fertiles et bien drainés, où la majorité des espèces d'arbres présentent de bonnes performances. Dans notre étude, les sites étaient plutôt caractérisés par de fortes pentes (23 % en moyenne), des sols relativement lourds (36 % d'argile en moyenne) et des classes de drainage fréquemment égales ou inférieures à la classe « imparfait » (Annexe B).

L'approche méthodologique adoptée, fondée sur des observations en contexte opérationnel, permet de documenter des situations réelles de plantation en coulée agricole et de mieux refléter la complexité des conditions rencontrées sur le terrain (von Gadow *et al.* 2016). À l'inverse, la majorité des études évaluant l'effet de pratiques sylvicoles ou de facteurs environnementaux sur l'établissement des arbres repose sur des dispositifs expérimentaux contrôlés, dans lesquels l'influence de nombreuses variables est volontairement réduite ou standardisée. Bien que ces approches soient essentielles pour isoler certains mécanismes écologiques, elles limitent souvent la transférabilité des résultats aux contextes opérationnels (Jacobs *et al.* 2004). En s'inscrivant dans une démarche appliquée, la présente étude contribue ainsi à combler ce déficit de connaissances en établissant un lien plus direct entre les résultats scientifiques et les réalités concrètes de l'implantation des arbres en coulées agricoles.

Dans ce contexte, l'intérêt de cette étude réside dans la singularité des conditions de croissance rencontrées en coulée agricole, où les facteurs abiotiques, biotiques et techniques interagissent de manière complexe et hétérogène. L'échantillonnage a inclus des individus de différentes espèces et de différents âges, établis dans des conditions de croissance variables, ce qui reflète la diversité des situations observées en milieu réel. Malgré cette hétérogénéité, les analyses statistiques employées ont permis de dégager des tendances robustes à l'échelle des populations étudiées, tout en tenant compte des différences propres à chaque site. Bien que certains résultats soient spécifiques aux espèces analysées, y compris celles représentées par un nombre limité d'individus, il est plausible que des réponses similaires

puissent également être observées chez d'autres espèces arborées non incluses dans l'étude. Cette hypothèse mériterait d'être examinée plus en détail dans le cadre de futures expérimentations menées en conditions contrôlées.

5.1. Une survie élevée malgré des conditions contraignantes

Le taux de survie global des arbres plantés dans notre étude, soit 73,4 % (55 espèces et genres non identifiés à l'espèce), au cours de leur phase d'établissement, est relativement élevé. Il est comparable à celui rapporté dans d'autres recherches menées dans des contextes réels et opérationnels, mais généralement réalisés dans des conditions édaphiques (e.g. drainage, fertilité) plus favorables. Par exemple, en Indiana (États-Unis), Jacobs *et al.* (2004) ont rapporté un taux de survie global de 65 % pour 41 espèces d'arbres plantées sur des terres anciennement cultivées ou en pâturage, ainsi que dans des bandes riveraines. Au Québec, Bourgeois *et al.* (2016) ont observé un taux de survie de 71,1 % dans des plantations comprenant 29 espèces d'arbres en milieu agricole établies en bandes riveraines. Mathieu *et al.* (2024) ont pour leur part observé un taux de survie de 86,4 % pour 25 taxons d'arbres implantés dans des haies brise-vent et des haies en bande riveraine. Nos résultats suggèrent donc que l'établissement d'arbres en coulées agricoles ne constitue pas, en soi, un obstacle technique majeur à leur implantation. Une certaine marge d'amélioration demeure toutefois possible afin d'optimiser le taux de survie, notamment en accordant une attention particulière à certains facteurs de succès qui se sont révélés significatifs dans notre étude et que nous présentons ici.

En ce qui concerne les facteurs biotiques, le type de végétation ligneuse implantée (feuillus, résineux, arbustes), de même que l'abondance d'arbustes spontanés, ont exercé un effet significatif sur le taux de survie des plants. Contrairement à notre première hypothèse, qui prédisait une survie plus élevée chez les résineux que chez les feuillus, ces derniers ont plutôt présenté un taux de survie légèrement supérieur. Ce résultat suggère que les plantations de feuillus ont été réalisées à l'aide de pratiques sylvicoles appropriées, notamment grâce à l'utilisation de protecteurs et de paillis pour la majorité des individus. Ces pratiques sont reconnues comme des facteurs clés favorisant la survie des plants (Sweeney *et al.* 2007; St-Denis *et al.* 2018).

L'abondance d'arbustes spontanés a exercé un effet positif sur le taux de survie de l'ensemble des espèces d'arbres plantés. Par ailleurs, la présence d'arbustes plantés a été associée à une augmentation du volume

conique du chêne rouge. La strate arbustive peut, qu'elle soit issue de régénération naturelle ou plantée, jouer un rôle de facilitation en offrant une protection physique contre l'herbivorie, en atténuant le stress abiotique des jeunes plants par l'amélioration des conditions microclimatiques (e.g. ombrage, réduction du vent et de la température de l'air) et en limitant l'abondance et la compétition de la végétation herbacée (Paquette *et al.* 2006; St-Denis *et al.* 2018). Par exemple, une étude menée en Ohio (États-Unis) a montré qu'une espèce arbustive spontanée (*Lonicera maackii*) favorisait la survie de l'érable à sucre en lui proccurant un abri protecteur et en diminuant le broutage, dans un contexte de forte abondance de cerfs de Virginie (Peebles-Spencer *et al.* 2017). Cet effet de facilitation n'était toutefois pas significatif pour les espèces moins tolérantes à l'ombre étudiées, soit le chêne blanc et le caryer ovale. De façon concordante, Limpens *et al.* (2020) ont observé que les arbres plantés sous des arbustes présentaient un taux de survie deux fois plus élevé que ceux implantés sans cette protection.

Parmi les facteurs techniques ayant exercé un effet significatif sur la survie des plantations, le fauchage de la végétation herbacée et le type de paillis se démarquent. Les plantations ayant bénéficié d'un fauchage au moins une fois par an ont présenté un taux de survie significativement plus élevé (72,3 %) que celles sans fauchage (53,9 %). Ce résultat concorde avec ceux d'autres études montrant que le fauchage contribue à réduire la mortalité des plants en limitant la compétition exercée par la végétation herbacée. Par exemple, Benayas *et al.* (2005) ont mené une expérience de trois ans en Espagne afin d'évaluer la réponse de trois espèces de chêne (*Q. coccifera*, *Q. ilex* et *Q. faginea*), présentant des exigences contrastées en ressources, sous des conditions avec présence de végétation adventice comparées à un fauchage répété. Les auteurs ont observé un effet positif et significatif du fauchage sur le taux de survie des trois espèces, qu'ils ont attribué à une augmentation du rayonnement photosynthétiquement actif ainsi qu'à une amélioration de l'humidité du sol. De leur côté, Sweeny *et al.* (2007) ont montré que la réduction de la végétation herbacée pouvait également favoriser le taux de survie des arbres feuillus, mais seulement lorsque ceux-ci étaient muni d'un protecteur contre les cerfs de Virginie, la suppression de la végétation pouvant autrement accroître l'exposition des jeunes plants à l'herbivorie.

En ce qui concerne le type de paillis, aucune différence significative de survie n'a été observée entre les plantations utilisant du paillis plastique, des copeaux de bois ou aucun paillis. Ce résultat demeure surprenant, considérant que plusieurs études ont montré un effet positif de différents types de paillage sur la survie de différentes espèces feuillues ou résineuses, comparativement à des témoins sans paillis (e.g. Truax *et al.* 2017; Machado *et al.* 2024). Cette absence d'effet pourrait toutefois être attribuable à un

déséquilibre dans la répartition des traitements, la majorité des sites (16/25) ayant été établis avec du paillis de plastique, ce qui pourrait avoir limité la puissance statistique nécessaire pour détecter des différences entre les types de paillis. Néanmoins, un effet positif du paillis de plastique sur le volume conique de l'érable à sucre a été observé, corroborant l'idée que la croissance des essences feuillues pourrait répondre plus fortement et favorablement au paillage plastique qu'aux conifères (Jones *et al.* 2020). Par ailleurs, une mortalité très élevée (71,85 %) a été observée chez les plants protégés par un biodisque à base de fibre de noix de coco. De manière similaire, le volumique conique des épinettes blanches était le plus faible sous ce traitement comparativement au paillis de plastique. Ces résultats peuvent s'expliquer par la surface limitée du produit (soit un diamètre d'environ 30 cm) ainsi que par sa vitesse de décomposition relativement rapide, réduisant son efficacité à long terme pour le contrôle de la végétation concurrente.

Contrairement à notre prédiction, la présence de protecteurs contre la faune n'a pas constitué un facteur déterminant de la survie des feuillus, bien que cette pratique ait eu un effet positif sur la croissance de plusieurs espèces, comme nous le verrons dans la section suivante. Toutefois, certaines études, notamment celles de Sweeny *et al.* (2007) et de Redick (2020), ont rapporté des augmentations notables du taux de survie des arbres feuillus en présence de protecteurs, suggérant que l'efficacité de cette pratique peut dépendre du contexte écologique et des pressions d'herbivorie locales.

5.2 Pratiques sylvicoles et pente comme principaux déterminants de la croissance

Une relation significative entre le volume conique et l'âge a été observée pour l'ensemble des essences. En théorie, la relation entre le volume conique d'un arbre et son âge suit une courbe sigmoïde (Pienaar *et al.* 1984). Cependant, étant donné que les arbres étudiés étaient jeunes (≤ 10 ans) et n'avaient pas atteint la maturité, seule la phase initiale de croissance est représentée ici, ce qui se traduit par une relation globalement monotone croissante entre le volume conique et l'âge. La croissance variait néanmoins selon les espèces. Pour cette raison, le volume a été évalué par espèce plutôt que de manière agrégée. Les espèces et genres ayant présenté les meilleures performances de croissance dans notre étude sont le pin rouge, les mélèzes, l'érable argenté et les peupliers. À l'inverse, les caryers ont montré une croissance nettement inférieure. Cette faible croissance est cohérente avec leur stratégie écologique. En effet, au cours des premières années, ces espèces investissent prioritairement leurs ressources dans le développement du système racinaire pivotant, au détriment de la croissance en hauteur, ce qui les rend

plus vulnérables à la compétition végétale durant la phase d'établissement (Graney 1990). Le portrait général des différences de croissance observées entre les espèces concorde avec celui rapporté dans d'autres études réalisées en contexte agricole sur des sites relativement plats et bien drainés (Cogliastro *et al.* 1997; Rivest et Cogliastro 2019; Mathieu *et al.* 2024). Par contre, les taux de croissance annuels en diamètre et en hauteur estimés dans notre étude sont globalement plus faibles (Annexe D, Tableau S4), suggérant des contraintes accrues à la croissance, possiblement liées à de mauvaises conditions de drainage. Les sections suivantes examinent plus en détail le rôle des principaux facteurs ayant influencé significativement la croissance.

5.2.1. Protection contre l'herbivorie

La présence de protecteurs contre l'herbivorie a eu un effet positif sur la croissance de la majorité des essences étudiées, notamment le chêne à gros fruits, le chêne rouge, l'érable rouge et le mélèze. Les arbres protégés présentaient généralement un volume conique supérieur à ceux non protégés, ce qui concorde avec de nombreuses études montrant que la réduction du broutement améliore la croissance et la survie des plantations (Abe 2022; Redick et Jacobs 2020). Toutefois, des protecteurs mal installés ont parfois été associés à une diminution du volume conique, notamment chez l'érable rouge. Une installation inadéquate peut provoquer des contraintes mécaniques, endommager les tissus foliaires ou le tronc et limiter ainsi la croissance et le développement de l'arbre (Rivest et Cogliastro 2019). Ces observations soulignent l'importance de vérifier régulièrement l'état des protecteurs afin d'assurer la réussite des plantations et la prévention des dommages mécaniques aux jeunes plants.

5.2.2. Compétition des plantes herbacées

Le contrôle de la végétation concurrente, notamment par le fauchage, a eu un effet globalement positif sur la croissance de plusieurs espèces feuillues. Le chêne bicolore, le chêne rouge, l'érable rouge et l'érable à sucre, en particulier, présentaient un volume conique supérieur dans les sites où la végétation herbacée était maîtrisée. Ces résultats sont cohérents avec la littérature, qui montre que la compétition herbacée peut réduire significativement la croissance de ce type d'espèces (Guérard *et al.* 2001; Adams et al. 2011). Chez le chêne rouge, l'effet de la végétation concurrente semblait toutefois dépendre de sa composition : une abondance accrue de phorbes était associée à une diminution marquée de la croissance, alors que les graminées montraient une tendance inverse. Les communautés de phorbes observées sur les sites étaient

généralement dominées par *Solidago* spp. et *Aster* spp. (Grenier, obs. pers.), espèces susceptibles de former des peuplements denses et pouvant exercer des effets inhibiteurs, notamment des mécanismes allélopathiques, bien que ceux-ci demeurent difficiles à démontrer en conditions naturelles (Horsley 1977; Burton et Bazzaz 1995). Chez l'érable rouge, malgré une tolérance reconnue à la compétition herbacée (Jobidon 2000), le contrôle de la végétation a également été associé à une croissance accrue. Ce résultat suggère que même les espèces relativement tolérantes bénéficient d'une réduction de la compétition durant la phase critique d'établissement, où l'accès aux ressources demeure un facteur déterminant de la croissance initiale.

5.2.3. Pente et position topographique

L'inclinaison de la pente a eu un effet négatif sur la croissance de plusieurs essences, notamment le chêne à gros fruits, le chêne rouge, l'érable rouge et le mélèze. De manière générale, une augmentation de l'inclinaison de la pente était associée à une diminution du volume conique. Cette relation peut s'expliquer par des conditions édaphiques moins favorables en terrain incliné, incluant une réduction de la profondeur du sol, une augmentation du ruissellement et une moindre disponibilité en eau et en nutriments (Fekedulegn *et al.* 2003; Lei *et al.* 2020).

Nous avons observé que le contenu en sable était généralement plus élevé en haut de pente, tandis que les contenus en limon et argile augmentaient en milieu et bas de pente (Annexe C, Figure S1 A à C). Malgré ce gradient textural, la position des plants sur la pente (i.e. haut, milieu, bas) n'a généralement pas eu d'effet significatif sur le volume conique des arbres, à l'exception du mélèze et du chêne à gros fruits. Les positions de bas de pente sont généralement caractérisées par des sols plus profonds et une accumulation d'eau et de nutriments, ce qui favorise l'enracinement et l'acquisition des ressources (Hanna *et al.* 1982; Zhang *et al.* 2021). D'ailleurs, nous avons mesuré un enracinement plus profond de la végétation en bas de pente qu'en haut de pente (Figure S1 D). Il est donc plausible que les espèces les plus tolérantes aux conditions de saturation en eau, comme le mélèze et le chêne à gros fruits, aient davantage bénéficié de cette disponibilité accrue en ressources (Niinemets et Valladares 2006).

5.2.4. Exposition de la pente

L'influence de l'exposition de la pente, qui modifie le rayonnement solaire quotidien ainsi que les conditions de température et d'humidité de l'air et du sol, différait selon les espèces et reflète possiblement leurs tolérances écophysiologiques aux conditions microclimatiques (Fekedulegn *et al.* 2003). Par exemple, le chêne à gros fruits et le chêne bicolore présentaient une croissance supérieure sur les pentes orientées vers l'ouest comparativement à celles vers le sud. Ces dernières, plus chaudes et plus irradiées, sont associées à une évaporation accrue et à un stress hydrique plus important, tandis que les pentes orientée vers l'ouest offrent un compromis plus favorable entre disponibilité en lumière et en eau, avec des températures moins extrêmes et une compétition herbacée potentiellement réduite, favorisant ainsi le développement des semis (Fekedulegn *et al.* 2003). L'interprétation de l'effet de l'exposition de la pente sur l'établissement d'espèces aux stratégies écologiques contrastées demeure toutefois limitée par le caractère observationnel de l'étude et gagnerait à être approfondie dans le cadre de dispositifs expérimentaux permettant de mieux isoler les mécanismes sous-jacents.

5.2.5. Propriétés physico-chimiques du sol

Contrairement à nos attentes initiales, nos résultats indiquent que la texture du sol, estimée par la teneur en argile, la classe de drainage ainsi que le pH du sol ont généralement eu un effet non significatif sur le volume conique de la plupart des essences étudiées. Cette absence d'effet pourrait s'expliquer par la faible variation de ces caractéristiques entre les sites. Par exemple, la teneur en argile était généralement élevée sur l'ensemble des sites, tandis que la classe de drainage variait principalement entre « imparfait » et « très mauvais », avec une représentation relativement marginale de sites à drainage rapide ou modéré (Annexe B). Cette homogénéité relative des conditions édaphiques pourrait ainsi avoir limité la détection d'influences de ces proriétés du sol sur la croissance des arbres, malgré leur rôle bien établi dans d'autres contextes (Day et Monk 1994; Dey 1995; Cogliastro *et al.* 1997).

5.3. Défauts des plants d'arbres associés à des stress abiotiques et biotiques

Le groupe des mélèzes présentait le plus grand nombre de défauts, incluant des irrégularités au niveau du tronc, la présence de têtes multiples ainsi que diverses autres anomalies. Ces défauts peuvent résulter de plusieurs facteurs, notamment l'herbivorie, le gel, la sécheresse, les insectes ou d'autres contraintes

environnementales. Les espèces les plus affectées par la descente de cime étaient le chêne bicolore et l'érable rouge. Chez les feuillus, ce type de dommage est généralement attribué à l'herbivorie du cerf de Virginie (Rooney et Waller 2003). Plusieurs espèces, dont les bouleaux, les érables, les peupliers et les saules, ont présenté des taux d'herbivorie relativemement élevés (~20 à 50 %), malgré la présence de protecteurs. Nos résultats suggèrent que ces espèces pourraient être préférentiellement broutées et que cette herbivorie a pu survenir en dépit des protecteurs, possiblement en raison d'une installation inadéquate ou d'une hauteur insuffisante de ceux-ci (Redick et Jacobs 2020). L'érable argenté, bien qu'étant l'espèce la plus broutée, ne présentait ni le plus grand nombre de défauts ni la descente de cime la plus marquée, ce qui suggère une certaine tolérance ou capacité de récupération face au broutage. Concernant les insectes, aucune différence significative entre les espèces n'a été observée quant aux dommages qu'ils provoquent. L'ensemble des dommages d'origine entomologique a été recensé sans distinction de leur nature, ce qui limite la comparaison des impacts selon les espèces. Par exemple, certains arbres portaient des nids de fourmis au collet ou aux racines, tandis que d'autres présentaient des déformations attribuables à des charançons. Ainsi, bien que la présence d'insectes soit répandue, il demeure difficile d'identifier les espèces les plus affectées.

5.4. Diversité des espèces d'arbres

Bien que certains sites aient été plantés avec une seule espèce, la richesse spécifique dépassait souvent quatre espèces. De plus, l'augmentation de la richesse spécifique et de l'indice de diversité de Shannon avec l'année de plantation, indique une diversification progressive des plantations, et ce, malgré une période temporelle relativement courte. Cette tendance reflète probablement une intégration croissante des connaissances écologiques dans les stratégies de boisement des coulées agricoles, alors que les bénéfices associés à la diversité des espèces d'arbres sont de plus en plus documentés. Une plus grande diversité d'espèces est reconnue pour favoriser la complémentarité des niches, accroître la résistance et la résilience aux ravageurs, aux agents pathogènes et aux extrêmes climatiques, ainsi que soutenir une biodiversité associée plus élevée (Liu *et al.* 2018; Messier *et al.* 2022). De plus, les plantations mixtes peuvent surpasser les monocultures en termes de production de biomasse et de séquestration de carbone, notamment grâce à des mécanismes de surproduction liés à la complémentarité des traits fonctionnels entre espèces (Feng et al. 2022; Warner et al. 2023). La diversification observée pourrait ainsi refléter non seulement des considérations écologiques, mais également une volonté d'optimiser le fonctionnement des écosystèmes et leur productivité à long terme. Néanmoins, la persistance de plantations faiblement

diversifiées indique que cette transition demeure partielle et possiblement contrainte par des facteurs opérationnels, économiques ou liés aux conditions de site.

6. CONCLUSION

6.1. Synthèse des principaux résultats

Cette étude, réalisée sur 25 sites répartis dans différentes régions du Québec, visait à évaluer le succès d'établissement de différentes espèces d'arbres plantées dans les coulées agricoles et à identifier les principaux facteurs abiotiques, biotiques et techniques influençant leur survie et leur croissance. Dans un contexte caractérisé par une forte variabilité des conditions de site et des pratiques d'établissement, les résultats ont permis de dresser un portrait intégré des performances des plantations en conditions réelles. Globalement, le taux de survie des arbres plantés a été de 73 %, une valeur comparable à celles rapportées dans d'autres contextes agroforestiers ou agricoles, malgré des conditions édaphiques et topographiques souvent contraignantes (pentes marquées, sols argileux et drainage fréquemment imparfait). La survie n'a pas diminué avec la sévérité apparente des conditions de site, ce qui suggère que l'établissement des arbres en coulées agricoles demeure généralement possible. Toutefois, les taux de croissance ont été globalement plus faibles que ceux rapportés dans des études réalisées dans d'autres contextes agroforestiers, ce qui indique que, malgré une bonne survie, les arbres ont été soumis à des contraintes de croissance, possiblement liées à des conditions de drainage déficientes.

De façon inattendue, la survie des feuillus a été similaire à celle des conifères, ce qui suggère que les conditions d'établissement et les pratiques sylvicoles mises en place ont pu atténuer les différences attendues entre ces groupes fonctionnels. La survie, et dans certains cas la croissance, ont augmenté avec la présence de végétation arbustive, ce qui suggère un effet de facilitation, notamment via la modification du microclimat et la réduction de l'herbivorie.

La survie et la croissance ont également été influencées par certaines pratiques de gestion de la végétation. Le fauchage de la végétation herbacée a eu un effet positif sur la survie et la croissance, alors que les effets du paillage ont été plus variables selon les types utilisés. La croissance a augmenté en présence de protecteurs contre l'herbivorie pour plusieurs espèces, bien que leur effet sur la survie ait été

limité, suggérant que leur efficacité dépend des conditions d'installation et de la pression locale d'herbivorie.

Les conditions abiotiques ont influencé la croissance des arbres. La croissance a diminué avec l'augmentation de la pente pour plusieurs espèces. La position topographique a eu des effets plus spécifiques selon les espèces, certaines ayant présenté une meilleure croissance en bas de pente, notamment les espèces tolérantes à des conditions de saturation en eau. L'exposition de la pente a également influencé la croissance de manière variable selon les espèces, reflétant des différences de tolérance aux contraintes microclimatiques. À l'inverse, les propriétés du sol, notamment la texture, le pH et le drainage, n'ont généralement pas eu d'effet significatif sur la croissance, possiblement en raison d'une faible variabilité entre sites.

Enfin, les plantations ont présenté une diversité d'espèces relativement élevée, avec une richesse spécifique dépassant souvent quatre espèces par site. La richesse spécifique et l'indice de diversité de Shannon ont augmenté avec l'année de plantation, indiquant une diversification progressive des plantations au fil du temps.

6.2. Limites de l'étude

La sélection des sites pour cette étude reposait sur une démarche volontaire des propriétaires, ce qui introduisait un biais potentiel d'échantillonnage. Certains propriétaires ont pu être plus enclins à participer lorsque leurs plantations avaient bien performé, tandis que d'autres, dont les plantations avaient moins bien réussi, ont pu être moins motivés à participer. Ce type de biais est bien documenté dans les études basées sur la participation volontaire d'agriculteurs (Bradley *et al.* 2007). L'absence d'une base de données exhaustive des plantations en coulées agricoles a également limité la possibilité de mettre en place un échantillonnage pleinement représentatif et équilibré des différentes conditions de site.

Au-delà de cette contrainte liée à la sélection des sites, le dispositif d'étude présente également un déséquilibre important dans les effectifs des espèces échantillonnées, certaines étant représentées par un nombre limité d'individus. Cette hétérogénéité peut limiter la robustesse des comparaisons interspécifiques et réduire la puissance statistique pour détecter certains effets. Enfin, la variabilité des conditions édaphiques était relativement restreinte, avec une prédominance de sols à texture lourde et

peu de sites présentant des sols légers ou bien drainés. Cette faible amplitude de variation a probablement limité la capacité à détecter l'influence de la texture du sol et des conditions de drainage sur la survie et la croissance des arbres.

Une autre limite importante concerne l'absence d'information sur la provenance génétique des plants inventoriés. La variation génétique intra- et interprovenance, non contrôlée dans cette étude, peut introduire une variabilité supplémentaire dans les réponses de croissance et de survie. Harrington *et al.* (2023) ont démontré que l'interaction entre la provenance génétique et les conditions du site peut influencer significativement la croissance des espèces forestières. Cependant, cette variation génétique peut aussi constituer un facteur de résilience, en augmentant la probabilité que certains génotypes soient mieux adaptés aux conditions locales hétérogènes (Aitken *et al.* 2008).

6.3. Perspectives de recherche

Plusieurs pistes de recherche pourraient être développées afin d'approfondir les mécanismes influençant l'établissement des arbres en coulées agricoles et d'optimiser les pratiques de boisement. D'abord, des dispositifs expérimentaux contrôlés permettraient d'isoler l'effet de facteurs de gestion clés, notamment la densité de plantation, le contrôle de la végétation concurrente et l'efficacité des protecteurs contre l'herbivorie. Des suivis détaillés de la pression d'herbivorie et de la performance réelle des protections dans le temps permettraient de mieux quantifier leur contribution.

Ensuite, les conditions microclimatiques et édaphiques fines (humidité du sol, température près du sol, vent) devraient être mieux documentées. Dans cette perspective, l'orientation de la pente et la position des plantations le long du gradient topographique (haut, milieu, bas) constituent un axe prometteur pour le développement de systèmes de plantation de précision, c'est-à-dire des dispositifs adaptés aux variations fines de microtopographie et de microclimat (St-Denis *et al.* 2018). Des expérimentations comparant des espèces aux stratégies écologiques contrastées selon ces gradients permettraient de mieux quantifier leurs effets combinés sur la croissance. De plus, le rôle des strates arbustives mérite d'être mieux caractérisé. Des dispositifs comparant des plantations avec et sans couverture arbustive, ou selon différents niveaux de densité et de structure, permettraient de distinguer les effets de facilitation, de compétition et de protection contre l'herbivorie.

D’autres pratiques sylvicoles pourraient constituer des pistes de recherche intéressantes afin d’améliorer le succès des plantations en coulées agricoles. Par exemple, l’utilisation de plants de grande taille pourrait améliorer la survie et la croissance, particulièrement dans des conditions contraignantes, tout en réduisant le recours aux protecteurs, dont l’usage et la dégradation peuvent constituer une source de pollution (Stanturcof *et al.* 2004; Rivest et Cogliastro 2019; Steele *et al.* 2021). Cette approche mériterait d’être testée en conditions de coulées agricoles afin de quantifier ses effets et d’évaluer ses interactions potentielles avec les espèces d’arbres et les conditions de site. Par ailleurs, les paillis basés sur des matériaux plus durables que les plastiques non dégradables actuellement largement utilisés, tels que les bioplastiques ou les paillis organiques, représentent également des avenues à approfondir (Coello *et al.* 2017; Shcherbatyuk *et al.* 2024). Leur efficacité comparative dans des systèmes de coulées agricoles demeure encore peu documentée et mérite des recherches supplémentaires.

Dans une perspective complémentaire, la restauration passive constitue une avenue de recherche intéressante dans le contexte des coulées agricoles. Cette approche, qui consiste à laisser la régénération naturelle suivre son cours sans intervention directe, pourrait être comparée au reboisement actif en termes de survie, de croissance, de biodiversité et de séquestration du carbone (Benjamin *et al.* 2005; Thibault *et al.* 2022; Wang *et al.* 2023). Des travaux futurs pourraient permettre d’identifier les conditions dans lesquelles cette approche constitue une alternative viable ou complémentaire aux plantations actives (Ruskule *et al.* 2016).

BIBLIOGRAPHIE

Abe, T. 2022. Effects of treeshelter on seedling performance: a meta-analysis. Journal of Forest Research 27: 171-181.

Adams, C.R., Kauth, P.J., Sorenson, J.W. 2011. Assessing competition between reed canary grass (Phalaris arundinacea) and swamp white oak (*Quercus bicolor*). Ecological Restoration 29: 332-338.

Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T., Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. Evolutionary Applications 1: 95-111.

Amichev, B.Y., Laroque, C.P., Belcher, K.W., Bentham, M.J., Van Rees, K.C.J. 2020. Shelterbelt systems establishment in Saskatchewan, Canada: a multi-criteria fuzzy logic approach to land suitability mapping. New Forests 51: 933-963.

Baah-Acheamfour, M., Chang, S.X., Bork, E.W., Carlyle, C.N. 2017. The potential of agroforestry to reduce atmospheric greenhouse gases in Canada: insight from pairwise comparisons with traditional agriculture, data gaps and future research. The Forestry Chronicle 93: 180-189.

Bagniewska-Zadworna, A., Arasimowicz-Jelonek, M., Smoliński, D., Stelmasik, A. 2014. New insights into pioneer root xylem development: evidence obtained from Populus trichocarpa plants grown under field conditions. Annals of Botany 113: 1235-1247.

Benayas, J.M.R., Navarro, J., Espigares, T., Nicolau, J.M., Zavala, M.A. 2005. Effects of artificial shading and weed mowing in reforestation of Mediterranean abandoned cropland with contrasting Quercus species. Forest Ecology and Management 212: 302-314.

Benayas, J.M.R., Bullock, J.M., Newton, A.C. 2008. Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation, and agricultural land use. Frontiers in Ecology and the Environment 6: 329-336.

Benjamin, K., Domon, G., Bouchard, A. 2005. Vegetation composition and succession of abandoned farmland: effects of ecological, historical and spatial factors. Landscape Ecology 20: 627-647.

Berkowitz, A.R., Canham, C.D., Kelly, V.R. 1995. Competition vs. facilitation of tree seedling growth and survival in early successional communities. Ecology 76: 1156-1168.

Bilodeau-Gauthier, S., Paré, D., Messier, C., Bélanger, N. 2011. Juvenile growth of hybrid poplars on acidic boreal soil determined by environmental effects of soil preparation, vegetation control, and fertilization. Forest Ecology and Management 261: 620-629.

Boulfroy, E., Varin, M., Lessard, G., Blouin, D., Duclos, I., Vézina, A. 2017. Amélioration de la biodiversité dans le milieu agricole de la Côte-de-Beaupré - années 1 à 3 (2014 à 2017). Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. et Institut de technologie agroalimentaire. Rapport 2017-04. 245 p. + annexes.

Boulfroy, B., Joanisse, G., Blouin, D. 2019. Optimisation de scénarios de plantation dans des bandes riveraines pour la séquestration du carbone. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. Rapport 2019-09. 82 p.

Bourgeois, B., Vanasse, A., Rivest, D., Poulin, M. 2016. Establishment success of trees planted in riparian buffer zones along an agricultural intensification gradient. Agriculture, Ecosystems and Environment 222: 60-66.

Boussougou, I.N., Brais, S., Tremblay, F., Gaussiran, S. 2010. Soil quality and tree growth in plantations of forest and agricultural origin. Soil Science Society of America Journal 74: 993-1000.

Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal 54: 464-465.

Bradley, A.J., Leach, K.A., Breen, J.E., Green, L.E., Green, M.J. 2007. Survey of the incidence and aetiology of mastitis on dairy farms in England and Wales. Veterinary Record 160: 253-258.

Burton, P.J., Bazzaz, F.A. 1995. Ecophysiological responses of tree seedlings invading different patches of old-field vegetation. Journal of Ecology 83: 99-112.

Champagne, E., Royo, A.A., Tremblay, J.-P., Raymond, P. 2021. Tree assisted migration in a browsed landscape: can we predict susceptibility to herbivores? Forest Ecology and Management 498: 119576.

Coello, J., Coll, L., Pique, M. 2017. Can bioplastic or woodchip groundcover replace herbicides or plastic mulching for valuable broadleaf plantations in Mediterranean areas? New Forests 48: 1-16.

Cogliastro, A., Gagnon, D., Coderre, D., Bhéreur, P. 1990. Response of seven hardwood tree species to herbicide, rototilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites. Canadian Journal of Forest Research 20: 1172-1182.

Cogliastro, A., Gagnon, D., Bouchard, A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. Forest Ecology and Management 96: 49-63.

Cogliastro, A., Gagnon, D., Bouchard, A. 1998. Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control? Annales des Sciences Forestières 54: 107-116.

Cogliastro, A., Gagnon, D., Daigle, S., Bouchard, A. 2003. Improving hardwood afforestation success: an analysis of the effects of soil properties in southwestern Quebec. Forest Ecology and Management 177: 347-359.

Cramer, V.A., Hobbs, R.J., Standish, R.J. 2008. What's new about old fields? Land abandonment and ecosystem assembly. Trends in Ecology and Evolution 23: 104-112.

D'Orangeville, L., Bouchard, A., Cogliastro, A. 2008. Post-agricultural forests: landscape patterns add to stand-scale factors in causing insufficient hardwood regeneration. Forest Ecology and Management 255: 1637-1646.

Day, F.P., Monk, C.D. 1974. Vegetation patterns on a southern Appalachian watershed. Ecology 55: 1064-1074.

De Blois, S., Brisson, J., Bouchard, A. 2004. Herbaceous covers to control tree invasion in rights-of-way: ecological concepts and applications. Environmental Management 33: 606-619.

De Steven, D. 1991. Experiments on mechanisms of tree establishment in old-field succession: seedling survival and growth. Ecology 72: 1076-1088.

Dey, D.C. 1995. Seedling ecology and silviculture of northern red oak. USDA Forest Service, General Technical Report NC-197.

Dey, D.C., Gardiner, E.S., Kabrick, J.M., Stanturf, J.A., Jacobs, D.F. 2010. Innovations in afforestation of agricultural bottomlands to restore native forests in the eastern USA. Scandinavian Journal of Forest Research 25: 31-42.

Drever, C.R., Cook-Patton, S.C., Akhter, F., Badiou, P.H., Chmura, G.L., Davidson, S.J., Desjardins, R.L., Dyk, A., Fargione, J.E., Fellows, M., Filewod, B., Hessing-Lewis, M., Jayasundara, S., Keeton, W.S., Kroeger, T., Lark, T.J., Le, E., Leavitt, S.M., LeClerc, M.-E., Lemprière, T.C., Metsaranta, J., McConkey, B., Neilson, E., St-Laurent, G.P., Puric-Mladenovic, D., Rodrigue, S., Soolanayakanahally, R.Y., Spawn, S.A., Strack, M., Smyth, C., Thevathasan, N., Voicu, M., Williams, C.A., Woodbury, P.B., Worth, D.E., Xu, Z., Yeo, S., Kurz, W.A. 2021. Natural climate solutions for Canada. Science Advances 7: 1-13.

De Steven, D. 1991. Experiments on mechanisms of tree establishment in old-field succession: seedling survival and growth. Ecology 72: 1076-1088.

Dey, D.C. 1995. Seedling ecology and silviculture of northern red oak. USDA Forest Service, General Technical Report NC-197.

Dey, D.C., Gardiner, E.S., Kabrick, J.M., Stanturf, J.A., Jacobs, D.F. 2010. Innovations in afforestation of agricultural bottomlands to restore native forests in the eastern United States. Scandinavian Journal of Forest Research 25: 31-42.

Fekedulegn, D., Hicks Jr, R.R., Colbert, J.J. 2003. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. Forest Ecology and Management 177: 409-425.

Feng, Y., Schmid, B., Loreau, M., Forrester, D.I., Fei, S., Zhu, J. et al. 2022. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions. Science 376: 865-868.

Fichtner, A., Härdtle, W., Li, Y., Bruelheide, H., Kunz, M., von Oheimb, G. 2017. From competition to facilitation: how tree species respond to neighbourhood diversity. Ecology Letters 20: 892-900.

Flinn, K.M., Vellend, M. 2005. Recovery of forest plant communities in post-agricultural landscapes. Frontiers in Ecology and the Environment 3: 243-250.

Fortier, J., Gagnon, D., Truax, B., Lambert, F. 2011. Understory plant diversity and biomass in hybrid poplar riparian buffer strips in pastures. New Forests 42: 241-265.

Gale, M.R., Grigal, D.F. 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. Canadian Journal of Forest Research 17: 829-834.

Gómez-Aparicio, L. 2009. The role of plant interactions in the restoration of degraded ecosystems: a meta-analysis across life-forms and ecosystems. Journal of Ecology 97: 1202-1214.

Graney, D.L. 1990. Carya ovata (Mill.) K. Koch. Silvics of North America 2.

Guérard, N., Barthélémy, D., Cabanettes, A., Courdier, F., Trichet, P. 2001. Influence de la compétition herbacée sur la croissance et l'architecture de jeunes chênes rouges d'Amérique (*Quercus rubra* L.) en plantation. AGRIS.

Haase, D., Batdorff, J., Rose, R. 1993. Effect of root form on 10-year survival and growth of planted Douglas-fir trees. Tree Planters' Notes 44: 53-57.

Habitat. 2022. L'afforestation en zone agricole, une solution nature pour contribuer à l'atténuation des changements climatiques. Rapport technique.

Hanna, A.Y., Harlan, P.W., Lewis, D.T. 1982. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. Agronomy Journal 74: 999-1004.

Harrington, C.A., Gould, P.J., Cronn, R. 2023. Site and provenance interact to influence seasonal diameter growth of *Pseudotsuga menziesii*. Frontiers in Forests and Global Change 6: 1173707.

Hooper, E., Condit, R., Legendre, P. 2002. Responses of 20 native tree species to reforestation strategies for abandoned farmland in Panama. Ecological Applications 12: 1626-1641.

Horsley, S.B. 1977. Allelopathic inhibition of black cherry by fern, grass, goldenrod, and aster. Canadian Journal of Forest Research 7: 205-216.

Jacobs, D.F., Ross-Davis, A.L., Davis, A.S. 2004. Establishment success of conservation tree plantations in relation to silvicultural practices in Indiana, USA. New Forests 28: 23-36.

Jobidon, R. 2000. Autoécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière du Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec.

Johnson, R., Pancake, D., Hainds, M., Gjerstad, D. 1995. The effects of planting tool on planting productivity and survival of longleaf pine bare-root seedlings. The Longleaf Alliance.

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.

Kijowska-Oberc, J., Staszak, A.M., Kamiński, J., Ratajczak, E. 2020. Adaptation of forest trees to rapidly changing climate. Forests 11: 123.

Kolb, T.E., Bowersox, T.W., McCormick, L.H. 1990. Influences of light intensity on weed-induced stresses of tree seedlings. Canadian Journal of Forest Research 20: 503-507.

Kozlowski, T.T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiology 17: 490-490.

Langvall, O., Nilsson, U., Örlander, G. 2001. Frost damage to planted Norway spruce seedlings: influence of site preparation and seedling type. Forest Ecology and Management 141: 223-235.

Lei, W., Dong, H., Chen, P., Lv, H., Fan, L., Mei, G. 2020. Study on runoff and infiltration for expansive soil slopes in simulated rainfall. Water 12: 222.

Limpens, J., Fijen, T.P.M., Keizer, I. et al. 2021. Shrubs and degraded permafrost pave the way for tree establishment in subarctic peatlands. Ecosystems 24: 370-383.

Liu, C.L.C., Kuchma, O., Krutovsky, K.V. 2018. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. Global Ecology and Conservation 15: e00419.

Machado, D.L., Dourado, M.N., de Freitas, M.S., de Souza, L.M., da Silva, E.M., Podadera, D.S., Guilherme, F.A.G. 2024. Organic mulching alters the soil microclimate, increases survival and growth of tree seedlings in restoration planting. Forests 15: 1777.

Magnoux, A., Cogliastro, A., Paquette, A. 2018. Growth of planted seedlings inside protective sleeves under strip openings of different widths in a post-agricultural forest. New Forests 49: 279-296.

Margolis, H. A., and Brand, D. G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. Canadian Journal of Forest Research, 20(4): 375–390.

Mathieu, A., Cogliastro, A., Rivest, D. 2024. Drivers of tree establishment in planted windbreaks and riparian buffers: a case study of farms in southern Quebec, Canada. Geoderma Regional 37: e00788.

Mauer, O., Rozmánek, M., Houšková, K. 2018. Drought spells and their impact on the growth of young plantations established with the containerized planting stock. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 66: 89-99.

Ménétrier, J., Perron, M., Daoust, G., Sirois, G. 2005. Le boisement des friches. Notice d'information. Gouvernement du Québec.

Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R., Auge, H., Baeten, L., Barsoum, N., Bruelheide, H., Caldwell, B., Cavender-Bares, J., Dhiedt, E., Eisenhauer, N., Ganade, G., Gravel, D., Guillemot, J., Hall, J.S., Hector, A., Hérault, B., Jactel, H., Koricheva, J., Kreft, H., Mereu, S., Muys, B., Nock, C.A., Paquette, A., Parker, J.D., Perring, M.P., Ponette, Q., Potvin, C., Reich, P.B., Scherer-Lorenzen, M., Schnabel, F., Verheyen, K., Weih, M., Wollni, M., Zemp, D.C. 2022. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! Conservation Letters 15: e12829.

Niinemets, Ü., Valladares, F. 2006. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecological Monographs 76: 521-547.

Ostfeld, R.S., Manson, R.H., Canham, C.D. 1997. Effects of rodents on survival of tree seeds and seedlings invading old fields. Ecology 78: 1531-1542.

Ostfeld, R.S., Canham, C.D. 1993. Effects of meadow vole population density on tree seedling survival in old fields. Ecology 74: 1792-1801.

Paquette, A., Bouchard, A., Cogliastro, A. 2006. Survival and growth of under-planted trees: a meta-analysis across four biomes. Ecological Applications 16: 1575-1589.

Peebles-Spencer, J.R., Gorchov, D.L. 2017. Are native tree seedlings facilitated by an invasive shrub where white-tailed deer are abundant? Natural Areas Journal 37: 540-548.

Pienaar, L.V., Shiver, B.D. 1984. An analysis of tree growth and yield response to clean-tilling and fertilization in slash pine plantations. Southern Journal of Applied Forestry 8: 123-125.

Provendier, D., Balandier, P. 2008. Compared effects of competition by grasses (graminoids) and broom (*Cytisus scoparius*) on growth and functional traits of beech saplings (*Fagus sylvatica*). Annals of Forest Science 65: 1-9.

Redick, C.H. 2019. Quantifying impacts of deer browsing and mitigation effects on hardwood forest regeneration. Master thesis. Purdue University.

Redick, C.H., McKenna, J.R., Carlson, D.E., Jenkins, M.A., Jacobs, D.F. 2020. Silviculture at establishment of hardwood plantations is relatively ineffective in the presence of deer browsing. Forest Ecology and Management 474: 118339.

Rivest, D., Cogliastro, A. 2019. Establishment success of seven hardwoods in a tree-based intercropping system in southern Quebec, Canada. Agroforestry Systems 93: 1073-1080.

Rooney, T.P., Waller, D.M. 2003. Direct and indirect effects of white-tailed deer on forest ecosystems. Forest Ecology and Management 181: 165-176.

Ruskule, A., Nikodemus, O., Kasparinskis, R., Prižavoite, D., Bojāre, D., Brūmelis, G. 2016. Soil–vegetation interactions in abandoned farmland within the temperate region of Europe. New Forests 47: 587-605.

Saucier, J.P., Berger, J.P., D'Avignon, H., Racine, P. 1994. Le point d'observation écologique. Normes techniques.

Schroeder, W.R., Naeem, H. 2017. Effect of weed control methods on growth of five temperate agroforestry tree species in Saskatchewan. The Forestry Chronicle 93: 271-281.

Seddon, N. 2022. Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. Science 376: 1410-1416.

Shcherbatyuk, N., Wortman, S.E., McFadden, D., Weiss, B., Weyers, S., Ahmad, W., et al. 2024. Alternative and emerging mulch technologies for organic and sustainable agriculture in the United States: a review. HortScience 59: 1524-1533.

Skousen, J., Gorman, J., Pena-Yewtukhiw, E., King, J., Stewart, J., Emerson, P., DeLong, C. 2009. Hardwood tree survival in heavy ground cover on reclaimed land in West Virginia: mowing and ripping effects. Journal of Environmental Quality 38: 1400-1409.

Soil Classification Working Group. 1998. The Canadian system of soil classification (3e éd.). Agriculture and Agri-Food Canada.

Stanturf, J.A., Connor, W.H., Gardiner, E.S., Schweitzer, C.J., Ezzell, A.W. 2004. Recognizing and overcoming difficult site conditions for afforestation of bottomland hardwoods. Ecological Restoration 22: 183-193.

St-Denis, A., Kneeshaw, K., Bélanger, N., Simard, S., Laforest-Lapointe, I., Messier, C. 2017. Species-specific responses to forest soil inoculum in planted trees in an abandoned agricultural field. Applied Soil Ecology 112: 1-10.

St-Denis, A., Kneeshaw, D., Messier, C. 2018. Effect of predation, competition, and facilitation on tree survival and growth in abandoned fields: towards precision restoration. Forests 9: 692.

Steele, M.A. 2021. Oak seed dispersal: a study in plant-animal interactions. Johns Hopkins University Press.

Stelzer, H. 2019. How to plant forest tree seedlings. University of Missouri Extension.

Sweeney, B., Czapka, S., Yerkes, T. 2002. Riparian forest restoration: increasing success by reducing plant competition and herbivory. Restoration Ecology 10: 392-400.

Thibault, M., Thiffault, E., Bergeron, Y., et al. 2022. Afforestation of abandoned agricultural lands for carbon sequestration: how does it compare with natural succession? Plant and Soil 475: 605-621.

Thiffault, N., Roy, V., Ménétier, J., Prégent, G., Rainville, A. 2013. La plantation. Dans Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les Publications du Québec.

Truax, B., Gagnon, D., Lambert, F., Fortier, J. 2017. Riparian buffer growth and soil nitrate supply are affected by tree species selection and black plastic mulching. Ecological Engineering 106: 82-93.

Truax, B., Fortier, J., Gagnon, D., Lambert, F. 2018. Black plastic mulch or herbicide to accelerate bur oak, black walnut, and white pine growth in agricultural riparian buffers. Forests 9: 258.

Visakorpi, K., Manzanedo, R.D., Görlich, A.S., Schiendorfer, K., Altermatt Bieger, A., Gates, E., Hille Ris Lambers, J. 2024. Leaf-level resistance to frost, drought and heat covaries across European temperate tree seedlings. Journal of Ecology 112: 559-574.

Von Althen, F.W.V. 1991. Afforestation of former farmland with high-value hardwoods. The Forestry Chronicle 67: 209-212.

Von Gadow, K., Zhao, X.H., Tewari, V.P., Zhang, C.Y., Kumar, A., Rivas, J.J.C., Kumar, R. 2016. Forest observational studies: an alternative to designed experiments. European Journal of Forest Research 135: 417-431.

Wang, L., Pedersen, P.B.M., Svenning, J.C. 2023. Rewilding abandoned farmland has greater sustainability benefits than afforestation. npj Biodiversity 2: 5.

Ward, J.S., Gent, M.P.N., Stephens, G.R. 2000. Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine. Forest Ecology and Management 127: 205-216.

Warner, E., Cook-Patton, S.C., Lewis, O.T., Brown, N., Koricheva, J., Eisenhauer, N., et al. 2023. Young mixed planted forests store more carbon than monocultures: a meta-analysis. Frontiers in Forests and Global Change 6: 1226514.

Wei, C., Jia, B., Gao, L., Liu, Z., Liang, Y., Zhang, X., Lu, X. 2023. Plant growth ability, rather than phylogenetic relatedness, predicts the effect of soil biota from an abandoned field on native and exotic plants. Journal of Plant Ecology 16: 1-11.

Yadav, D., Wang, J. 2017. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. Environmental Pollution 230: 1040-1049.

Zadworny, M., Comas, L.H., Eissenstat, D.M. 2018. Linking fine root morphology, hydraulic functioning and shade tolerance of trees. Annals of Botany 122: 239-250.

Zerriffi, H., Reyes, R., Maloney, A. 2023. Pathways to sustainable land use and food systems in Canada. Sustainability Science 18: 389-406.

Zhang, Q., Wang, Z., Yao, Y., Kong, W., Zhao, Z., Shao, M., Wei, X. 2021. Effects of slope morphology and position on soil nutrients after deforestation in the hilly loess region of China. Agriculture, Ecosystems and Environment 321: 107615.

ANNEXE A

Tableau S1. Variables explicatives testées pour expliquer le volume conique de chacune des sept espèces sélectionnées. Chaque variable catégorique devait avoir un minimum de deux catégories avec un minimum de trois individus mesurés par catégorie (les catégories ayant moins de trois individus étaient exclues) et chaque variable continue devaient avoir un minimum de 10 individus mesurés. Pour l'épinette blanche, la présence de protecteurs au site n'a pas été considérée étant donné que cela ne concerne pas cette espèce.

Catégorie	Variable explicative	Épinette blanche	Chêne à gros fruits	Mélèze	Érable rouge	Chêne bicolore	Érable à sucre	Chêne rouge
Facteurs abiotiques	Âge de la plantation	X	X	X	X	X	X	X
	Saison de plantation		X		X	X	X	
	pH du sol	X	X	X	X	X	X	X
	Contenu en sable du sol	X	X	X	X	X	X	X
	Contenu en limon du sol	X	X	X	X	X	X	X
	Contenu en argile du sol	X	X	X	X	X	X	X
	Inclinaison de la pente	X	X	X	X	X	X	X
	Exposition de la pente	X	X	X	X	X	X	X
	Position dans la pente	X	X	X	X	X	X	X
	Présence d'un couche indurée				X	X		X
	Présence de compaction	X	X	X	X	X	X	X
	Présence de nappe		X		X	X		X
	Profondeur de nappe							
	Classe de drainage	X	X	X	X	X	X	X
Facteurs biotiques	Composition (feuillus, mixte ou résineux)	X	X		X	X	X	X
	Présence d'arbustes plantés		X		X	X		X
	Abondance d'arbustes	X	X	X	X	X	X	
	Abondance de phorbes	X	X	X	X	X	X	X
	Abondance de graminoïdes	X	X	X	X	X	X	X
	Abondance autres	X	X					
	Abondance totale végétation	X	X	X	X	X	X	X
	Profondeur d'enracinement	X	X	X	X	X	X	X
Facteurs techniques	Distance entre les plants	X	X	X	X	X	X	X
	Présence de préparation du sol	X	X	X	X		X	X
	Présence de fauchage	X	X	X	X	X	X	X
	Présence de paillis	X		X	X		X	X
	Type de paillis	X	X	X	X	X	X	X
	Présence de protecteur		X	X	X		X	X
	Défaut d'installation du protecteur		X	X	X	X		X

ANNEXE B

Tableau S2. Synthèse des caractéristiques des sites inventoriées.

Site	Municipalité	coordonée géographique	Âge (Ans)	Essences principales	pH moyen	Pente moyenne (%)	Classe de drainage	% sable	% limon	% argile
1	St-Vallier	46°53'59"N 70°48'02"W	1	CHBI, EPB, ERR	6,4	7	très mauvais	5	30	65
2	St-Aimé	45°54'27"N 72°55'13"W	2	CHBI, CHG, MEL, ERR, ERS, EPB	6,0	36	imparfait	25	38	37
3	St-David	45°56'01"N 72°54'48"W	2	CHBI, CHG, CHB, ERS, ERR	5,2	15	imparfait	42	42	16
4	St-David	45°55'58"N 72°54'40"W	2	CHBI, CHG, ERS, ERR	5,4	20	modérément bon	43	45	13
5	St-Hugues	45°47'06"N 72°52'34"W	3	MIC, ORA, ERS	5,6	36	imparfait	10	46	43
6	St-Ursule	46°18'32"N 73°02'43"W	8	EPB	5,3	17	imparfait	15	38	47
7	St-Ursule	46°18'38"N 73°02'46"W	5	EPB	5,1	35	imparfait	6	42	52
8	Baie-du-Febvre	46°06'25"N 72°43'52"W	4	CHBI, CHR, EBP, ERR, ERS, NON, PIR	6,2	15	imparfait	12	24	64
9	St-Constant	45°21'19"N 73°35'12"W	2	CER, CHR, ERR	6,4	21	Non disponible*	4	21	75
10	St-Ursule	46°18'46"N 73°02'51"W	5	EPB	6,1	32	imparfait	6	32	62
11	St-Aimé	45°53'44"N 72°55'54"W	3	CHBI, CHG, CHR, CER, MEL, NOC, MIC	5,5	22	imparfait	43	37	20
12	Notre-Dame-de-la-Paix	45°48'08"N 75°01'19"W	2	CHBI, CHG, MEL, MIC	5,9	15	modérément bon	33	34	33
13	St-Marcel-de-Richelieu	45°50'51"N 72°56'46"W	1	BOG, CHBI, CHG, CHM, CHR, EPB,ERA, ERR, ERS, MEL, PEU, SAU, THO	5,6	21	modérément bon	33	43	24
14	Hébertville	48°23'18"N 71°39'56"W	7	CHG, LIL	5,8	20	mauvais	10	51	39
15	Lac-Saint-Jean-Est	48°22'56"N 71°39'34"W	2	PIB, PIR, SUM	6,2	48	bon	16	51	32
16	Hébertville	48°23'34"N 71°43'56"W	2	EPB, ERR, MEL, PIB	6,5	35	bon	43	37	20
17	Lac-à-la-Croix	48°23'44"N 71°50'06"W	2	BOJ, CHR, ERS, MEL	5,6	17	mauvais	12	53	35
18	St-Aimé	45°53'34"N 72°55'53"W	1	CAC, CER, CHBI, CHG, CHR, ERR, NOC, TIA	5,7	11	imparfait	33	46	21
19	St-Hugues	45°46'27"N 72°50'39"W	5	CHG, ERR	5,4	15	imparfait	21	27	52
20	St-Hugues	45°47'54"N 72°48'52"W	5	CHB, CHG, CHR, ERS, TIA, MIC	5,4	18	imparfait	23	48	29
21	St-Zéphir-de-Courval	46°06'04"N 72°35'60"W	6	CHG	5,6	21	Non disponible*	14	27	59
22	Pintendre	46°46'36"N 71°08'47"W	1	ERR	5,1	21	imparfait	13	44	44
23	La Visitation-de-Yamaska	46°06'49"N 72°33'08"W	1	BOP, CER, CHBI, EPB, ERR, SAU	6,3	28	imparfait	10	23	67
24	St-Amable	45°37'41"N 73°17'13"W	1	CHR, ERA, ERR, MIC, EPEB, PIR, SAU	6,0	22	imparfait	13	40	47
25	La Visitation-de-Yamaska	46°06'44"N 72°33'43"W	1	CHBI, MIC, PEB, PIR	6,0	35	mauvais	11	34	54

*Refus du propriétaire pour creuser un pédon sur le site

CHBI = Chêne bicolore, EPB= Épinette blanche, ERR= Érable rouge, CHG = Chêne à gros fruits, MEL = Mélèze laricin, ERS= Érable à sucre, CHB = Chêne blanc, MIC= miccocoulier, ORA = Orme d'amérique, NON= Noyer noir, PIR= Pin rouge, CER= Cerisier, NOC= Noyer cendrée, BOG= Bouleau gris, CHM= Chêne des marais, ERA= Érable argentée, PEU = Peuplier, SAU= Saule, THO = thuya occidental, LIL = lilas, SUM= Sumacs, BOJ = Bouleau jaune, CAC= Caryer cordiforme, TIA = tilleul d'amérique, BOP= Bouleau à papier.

ANNEXE C

Des modèles mixtes avec un seul facteur ont été utilisés pour tester l'effet de la position dans la pente sur huit conditions édaphiques, soit le pH, les contenus en sable, limon et argile, la classe de drainage, la profondeur et la présence de nappe, et la profondeur d'enracinement. Ils avaient cette forme :

Condition édaphique ~ Position dans la pente + (1|Site)

où la position dans la pente est une variable catégorique (bas, milieu ou haut) et l'effet aléatoire contrôle pour la corrélation spatiale intra-site. La distribution de la variable dépendante a été supposée normale et une ANOVA a permis de tester la significativité de l'effet fixe, à l'exception de la présence de nappe qui a été analysée avec une distribution binomiale et un test du rapport de vraisemblance pour la significativité.

La position dans la pente avait un effet significatif ($P < 0,05$) ou marginalement significatif ($P < 0,1$) sur les contenus en sable, limon et argile, ainsi que la présence de nappe et la profondeur d'enracinement (Tableau S3). Le contenu en sable était généralement plus élevé en haut de pente alors que les contenus en limon et argile étaient plus élevés en milieu et bas de pente (Figure S1 A à C). L'enracinement était plus profond en bas de pente qu'en haut de pente (Figure S1 D). Les comparaisons multiples entre les trois positions n'ont rien révélé pour la présence de nappe, mais la nappe a été observée uniquement dans les pédons en bas (3 sur 15) et haut (2 sur 17) de pente, alors qu'aucune observation n'a été faite en milieu de pente (0 sur 18).

Tableau S3. Résultats des modèles testant l'effet de la position dans la pente sur différentes conditions édaphiques. Pour chaque modèle, la taille d'échantillon (*N*), le coefficient de détermination (R^2) marginal (effets fixes seulement) et conditionnel (effets aléatoires et fixes), et les valeurs de *P* sont montrés.

	Variable dépendante							
	pH	**Sable**	**Limon**	**Argile**	**Classe de drainage**	**Profondeur de nappe**	**Présence de nappe**	**Profondeur d'enracinement**
N	181	181	181	181	50	5	50	50
R^2 marginal	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.28		0.04
R^2 conditionnel	0.33	0.47	0.51	0.66	0.68	0.92		0.64
Variable indépendante (valeur de *P*)								
Position dans la pente	0.79	**0.03**	**0.02**	0.06	0.80	0.47	0.08	0.07

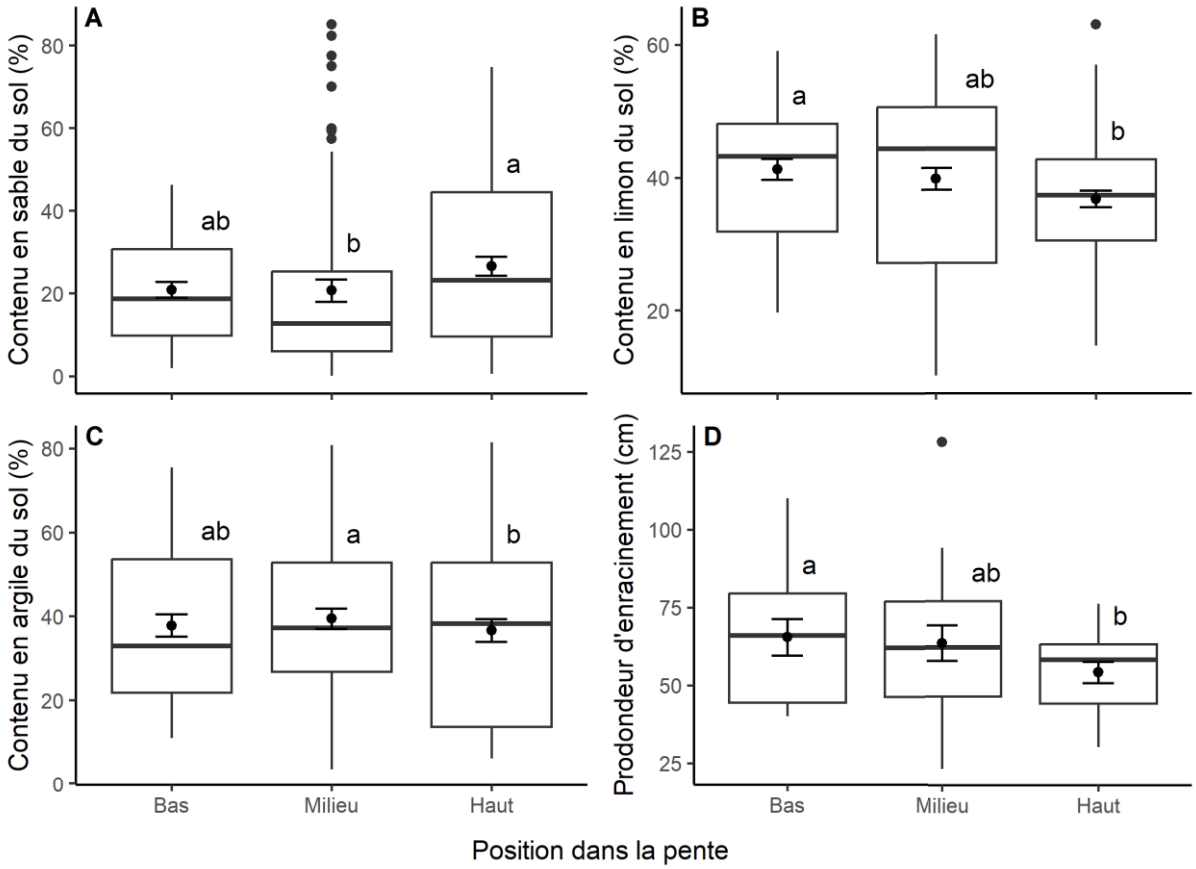

Figure S1**.** Effet de la position dans la pente sur le contenu en sable (**A**), limon (**B**) et argile (**C**) du sol, ainsi que la profondeur d'enracinement (**D**). Les points et les barres d'erreurs représentent les moyennes et leurs erreurs-types. Des lettres différentes représentent une différence significative (test de Tukey, $P < 0,05$ [$P < 0,1$ pour **C** et **D**]). Les boîtes représentent la médiane et l'écart interquartile (EI) et leurs moustaches représentent les valeurs les plus éloignées de la boîte à une distance en deçà de 1,5 × EI.

ANNEXE D

Tableau S4. Accroissement annuel moyen (± erreur-type) pour chaque espèce présente dans des plantations de 4 ans et plus et ayant un minimum de 10 individus mesurés. L'accroissement est basé sur un diamètre initial de 0.6 cm et des hauteurs initiales de 28 cm pour les conifères et de 38 cm pour les feuillus. Les tailles moyennes pour chaque âge de plantation et pour chaque espèce sont aussi montrées, ainsi que le nombre d'individus mesurés.

	Accroissement (cm an^{-1})		**Taille 4 ans (cm)**			**Taille 5 ans (cm)**			**Taille 6 ans (cm)**			**Taille 7 ans (cm)**			**Taille 8 ans (cm)**		
Espèce	**Diam.**	**Haut.**	***N***	**Diam.**	**Haut.**	***N***	**Diam.**	**Haut.**	***N***	**Diam.**	**Haut.**	***N***	**Diam.**	**Haut.**	***N***	**Diam.**	**Haut.**
Chêne à gros fruits	0.36 ± 0.04	21 ± 2	8	2.5 ± 0.5	147 ± 29	26	1.4 ± 0.1	111 ± 8	5	4.8 ± 0.2	271 ± 13	9	5.1 ± 0.5	204 ± 21			
Chêne rouge	0.32 ± 0.05	20 ± 3	4	2.4 ± 0.2	132 ± 7	8	1.8 ± 0.4	141 ± 20				2	3.3 ± 0.7	108 ± 6			
Épinette blanche	0.53 ± 0.03	20 ± 1	4	5.4 ± 0.7	192 ± 14	43	3 ± 0.1	119 ± 4							17	4.6 ± 0.3	195 ± 13
Érable rouge	0.28 ± 0.05	15 ± 4	10	1.9 ± 0.3	106 ± 22	4	1.4 ± 0.2	82 ± 31									
Érable à sucre	0.28 ± 0.03	17 ± 2	5	1.9 ± 0.2	100 ± 16	8	1.9 ± 0.2	128 ± 11									
Noyer noir	1.32 ± 0.12	48 ± 5	11	5.9 ± 0.5	230 ± 21												
Tilleul d'Amérique	0.32 ± 0.08	14 ± 3				10	1.8 ± 0.2	102 ± 14				1	7.7	223			