



**PROGRAMME D'APPUI À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN AGRICULTURE**

**OPTIMISATION DE L'EFFICACITÉ DES HAIES BRISE-VENT ET ESTIMATION DE LEUR POTENTIEL DE SÉQUESTRATION DE CARBONE DANS LA RÉGION SAGUENAY-LAC ST-JEAN**

**NUMÉRO DU PROJET : Mesure 3938-AGRO-002**

**DURÉE DU PROJET : 27 AOÛT 2020 / 1<sup>ER</sup> FÉVRIER 2024**

**RAPPORT FINAL**

Réalisé par :  
Charles Marty et Patrick Faubert  
Université du Québec à Chicoutimi

24 juillet 2024

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

**TITRE DU PROJET :**  
**Optimisation de l'efficacité des haies brise-vent et estimation de leur potentiel de séquestration de carbone dans la région Saguenay-Lac St-Jean**

**NUMÉRO DU PROJET :**  
**Mesure 3938-AGRO-002**

**RÉSUMÉ DU PROJET**

Contexte :

La présence de haies brise-vent dans un agroécosystème peut fournir une variété de bénéfices économiques, agronomiques, environnementaux et sociaux. Néanmoins, il n'est pas rare que des agriculteurs renoncent à l'implantation de haies sur leurs parcelles ou les retirent car ces bénéfices ne sont pas suffisamment perceptibles ou parce qu'elles entrent en conflit avec les pratiques agricoles et nécessitent trop d'entretien. Il est donc important d'adapter les haies brise-vent (de leur conception à leur implantation) aux caractéristiques environnementales, économiques et agronomiques locales, afin de maximiser leurs bénéfices et de minimiser leurs effets indésirables. Au cours des vingt dernières années, le MAPAQ a soutenu l'implantation de haies brise-vent à travers la région du Saguenay-Lac Saint-Jean, mais pas toujours selon des directives précises. L'objectif général de ce travail était de récolter des données qui permettront d'améliorer les pratiques d'aménagement des haies brise-vent dans le futur.

Objectifs :

Le premier objectif spécifique était de caractériser les haies de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et en faire une typologie à partir d'une base de données qui nous avait été fournie par le MAPAQ et d'un échantillonnage de terrain. Le deuxième objectif était de mesurer les stocks de carbone des haies et leur potentiel de séquestration du carbone sur le long terme en fonction de leurs caractéristiques (essences utilisées, espacements entre les arbres, type de sol etc.). Le troisième objectif était d'estimer l'effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures adjacentes et de produire des fiches techniques qui permettront d'adapter la conception des haies brise-vent en fonction du contexte local. Enfin, le quatrième objectif était de tester la possibilité d'utiliser des sous-produits industriels (biosolides de papeteries [BP] et anhydrite [A]) pour la fertilisation des haies brise-vent à travers la région. Pour ce faire, un dispositif expérimental a été mis en place à la Bleuetière d'enseignement et de recherche (BER) de l'UQAC à Normandin. À terme, les résultats issus de cette expérimentation nous permettront aussi d'évaluer l'effet des haies brise-vent sur la production de bleuets (qualité, quantité, constance des rendements etc.) et de connaître les modes d'entretien les plus efficaces (fertilisation, essences, et mode de taille des arbres notamment).

Résultats :

Objectif 1 : Caractérisation et typologie des haies de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean

Le MAPAQ a contribué à l'implantation de près de 633 km de haies brise-vent dans 33 municipalités de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017. La diversité spécifique des haies est globalement élevée : 102 espèces ligneuses (44 espèces d'arbustes, 44 espèces d'arbres feuillus et 14 espèces d'arbres conifères) ont été plantées et plus de 50% des haies sont composées de cinq espèces ou plus. Le mélèze laricin, l'épinette blanche et le chêne à gros fruits sont les trois espèces les plus fréquentes dans les haies de la région, chacune étant présente dans environ la moitié des municipalités. Sur le plan de la structure, plus de 95% des haies sont composées d'une seule rangée d'arbres et arbustes.

#### Objectif 2 : Mesure des stocks de carbone des haies et de leur potentiel de séquestration du carbone sur le long terme

L'échantillonnage de terrain sur 55 haies à travers 20 exploitations agricoles a montré que : a) la hauteur des haies à l'étude variait de 1.3 à 11.3 m au moment de l'échantillonnage; b) 64% des haies étaient mixtes (conifères et feuillus) et 36% n'étaient composées que de conifères; c) le taux de mortalité sur les 55 haies à l'étude était globalement faible (7.1% en moyenne); d) le stock de carbone dans la biomasse était < 5 t C /km pour 35% des haies mais pouvait atteindre jusqu'à plus de 50 t C/km dans les haies les plus âgées et les plus productives; e) le peuplier hybride est de loin l'essence la plus productive, pouvant atteindre des hauteurs de plus de 10 m, des DHP de plus de 30 cm et un stock de carbone par arbre de plus de 100 kg C en une décennie; f) les stocks de carbone dans les haies mesurées sur le terrain concordent bien avec les projections du modèle Holos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada; g) Par conséquent, ce modèle a pu être utilisé pour réaliser des projections des potentiels de séquestration du carbone à 25, 50 et 75 ans d'un sous-échantillon de 30 haies de la région : le potentiel de séquestration total de carbone des haies (biomasse + sol) sur une période de 75 ans variait de 5.1 t à 597.3 t C/km (0.07 à 1.33 t C/km/an) selon les haies, dont + de 90% se trouvait dans la biomasse; h) Contrairement à notre hypothèse, le sol des haies ne contenait en moyenne pas plus de carbone que le sol des parcelles agricoles adjacentes (105.8 contre 109.4 t C/ha), et ce malgré l'accumulation de matière organique à la surface du sol (environ 8 t C/ha). Néanmoins, la grande majorité des haies échantillonnées étaient jeunes (< 25 ans) et on peut donc s'attendre à ce que le stock de carbone du sol des haies s'accroisse dans le futur.

#### Objectif 3 : Effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures adjacentes

Dans la parcelle à l'étude, le rendement de grain d'orge à 2 m de la haie était quasiment trois fois plus faible qu'au centre de la parcelle et quasiment quatre fois plus faible qu'à 20 m de la haie. Le rendement à 5 et 10 m était légèrement inférieur (8 à 16%) à celui au centre de la parcelle. Nos résultats suggèrent que la haie diminue le rendement d'en moyenne 20% dans les 10 m longeant la haie brise-vent, mais l'améliore jusqu'à 20% entre 20 et 30 m de distance. Au total, nos résultats suggèrent que les pertes de rendement dans la bande de compétition de 10 m sont compensées par les gains de rendement dans le reste de la zone d'influence de la haie. Ces recherches doivent néanmoins être étendues à d'autres parcelles et d'autres cultures pour confirmer ces résultats.

#### Objectif 4 : Évaluation de la possibilité d'utiliser des sous-produits industriels pour la fertilisation des haies brise-vent

La fertilisation des haies expérimentales de la BER a donné des résultats intéressants : les biosolides de papeteries ont eu des effets positifs plus marqués sur le mélèze laricin et le pin blanc en fin de deuxième saison après leur application. Le suivi du dispositif se poursuivra

sur le long terme afin de connaître la pérennité de ces effets et de connaître les associations d'essences qui sont les plus efficaces pour protéger les cultures de bleuets adjacentes.

### Conclusion :

Notre étude montre un bon état général des haies brise-vent de la région avec une diversité spécifique élevée, un faible taux de mortalité et un bon potentiel de séquestration du carbone pour les haies composées d'essences productives comme le peuplier hybride, le mélèze laricin ou l'orme. Le mélèze laricin, l'essence la plus plantée dans les haies de la région, possède des caractéristiques propices à son utilisation dans les haies : une croissance forte et constante d'une haie à l'autre.

Les dimensions des arbres et la structure des haies au cours des années d'échantillonnage (2021, 2022 et 2023) nous ont permis d'estimer le potentiel de séquestration du carbone de ces haies à en moyenne 77 et 100 t C/km sur le moyen (50 ans) et long-terme (75 ans), respectivement.

La structure des haies doit être adaptée à leurs objectifs spécifiques (biodiversité, abris pour les animaux, protection contre le vent...) ainsi qu'à la spécificité des parcelles adjacentes (type de culture et de matériel agricole utilisé, type de sol, etc.). Nous avons rédigé des fiches techniques pour mettre en avant les avantages des haies brise-vent et les bonnes pratiques d'aménagement et d'entretien (objectif 3). Nous recommandons de planter des essences à croissance rapide et pouvant atteindre une hauteur élevée de manière à augmenter l'aire de protection des cultures et ainsi maximiser l'effet bénéfique des haies. Les données concernant l'effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures sont encore trop parcellaires pour pouvoir tirer des conclusions définitives mais les recherches vont se poursuivre en 2024 et des résultats plus clairs seront disponibles dans les années à venir.

Enfin les effets sont à suivre pour la fertilisation des haies avec des sous-produits industriels. Ce dispositif a été installé en 2021 et le suivi a été fait jusqu'en 2023. Les arbres sont encore jeunes et un suivi de ce dispositif est prévu sur une base régulière dans les prochaines années. Ici, les avantages potentiels d'utiliser des sous-produits industriels fertilisants en haies brise-vent sont 1) qu'ils peuvent remplacer des engrais minéraux qui ont de grands impacts environnementaux avant même leur application au champ (e.g., émissions de GES, extraction de matière première, procédés industriels pour la conception, etc.), 2) qu'il serait logistiquement facile pour un producteur fertilisant son champ avec ces sous-produits de les appliquer également sur sa haie brise-vent adjacente et 3) que dans une perspective plus globale cette pratique rencontrerait des principes de base d'une économie circulaire, d'une bioéconomie et de l'implantation de synergies industrielles dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

## **OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE**

### **1) Caractérisation et typologie des haies de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean**

Cet objectif a été atteint. La base de données du MAPAQ contient des informations sur les haies brise-vent qui ont été implantées dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017. Ces informations concernent notamment les municipalités, la longueur de haies implantées, le nombre de végétaux et d'espèces plantées. L'analyse de cette base de données nous a permis de faire ressortir les principales caractéristiques des haies brise-vent de la région (essences dominantes, diversité spécifique, densité de plantation, mortalité et

croissance des arbres etc.) et de sélectionner un échantillon de haies pour des mesures sur le terrain.

## **2) Mesure des stocks de carbone des haies et de leur potentiel de séquestration du carbone sur le long terme**

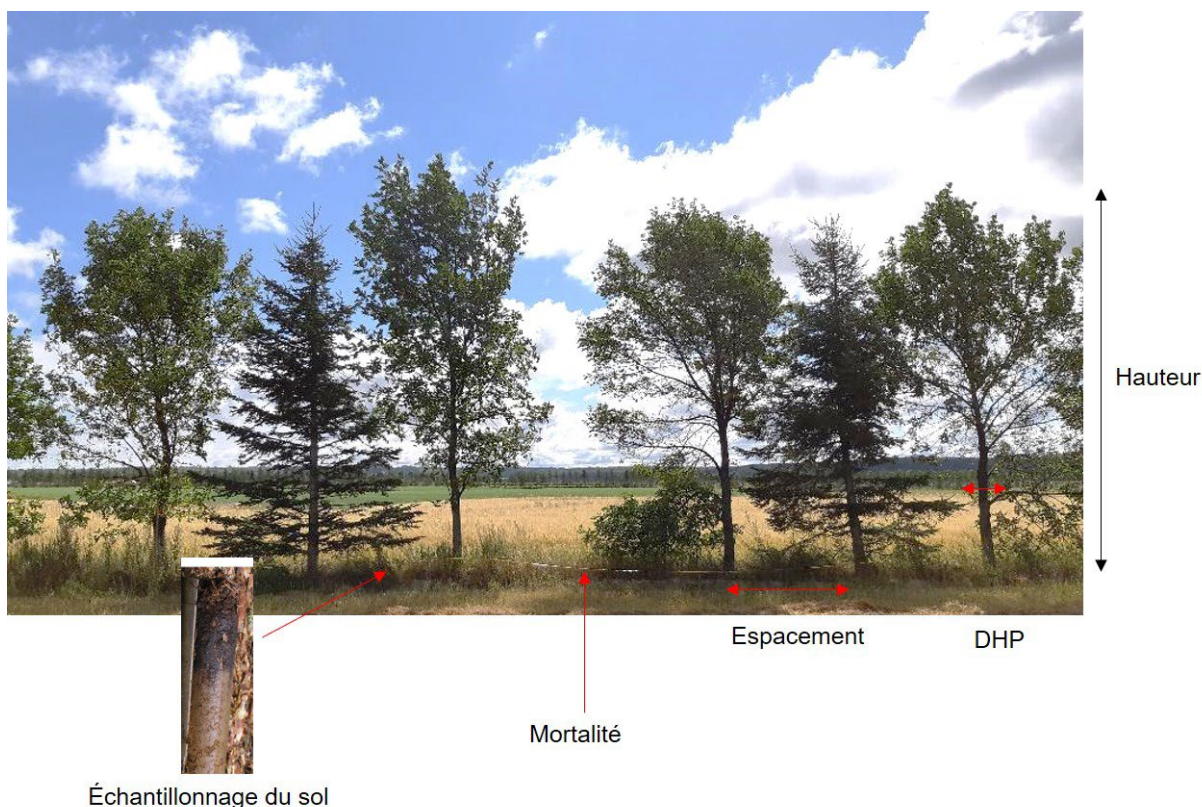
Pour atteindre cet objectif, nous avons échantillonné un total de 55 haies brise-vent de la région et mesuré plus de 1300 arbres.

### **a. Estimation de la biomasse et du contenu en carbone des arbres**

Pour ce faire, nous avons identifié les essences présentes dans les haies, mesuré la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres, leur espacement, leur taux de survie et le nombre de rangs dans la haie sur deux à trois sections de 20 m de longueur pour chacune des haies (Figure 1). Ces mesures nous ont permis d'estimer la biomasse aérienne des arbres à partir des équations allométriques fournies par Lambert et al. (2005) (Annexe 1).

La biomasse racinaire a été estimée à partir des ratios biomasse racinaire / biomasse totale utilisés dans le Modèle du Bilan de Carbone du Secteur Forestier Canadien (MBC-SFC3) : 18% pour les espèces de conifères et 25% pour les espèces de feuillus. Ces valeurs sont cohérentes avec les estimations publiées récemment pour la région (Ma et al. 2021).

Ces biomasses ont été multipliées par un facteur  $0.5 \text{ kg C kg}^{-1}$  pour obtenir le contenu en carbone de chaque arbre composant les haies (Boucher et al. 2019). Le stock de carbone dans la biomasse des haies a été calculé comme la somme du stock de carbone de tous les arbres inclus dans les sections de 20 m et normalisé pour une longueur de 1 km ( $\text{t C km}^{-1}$ ).

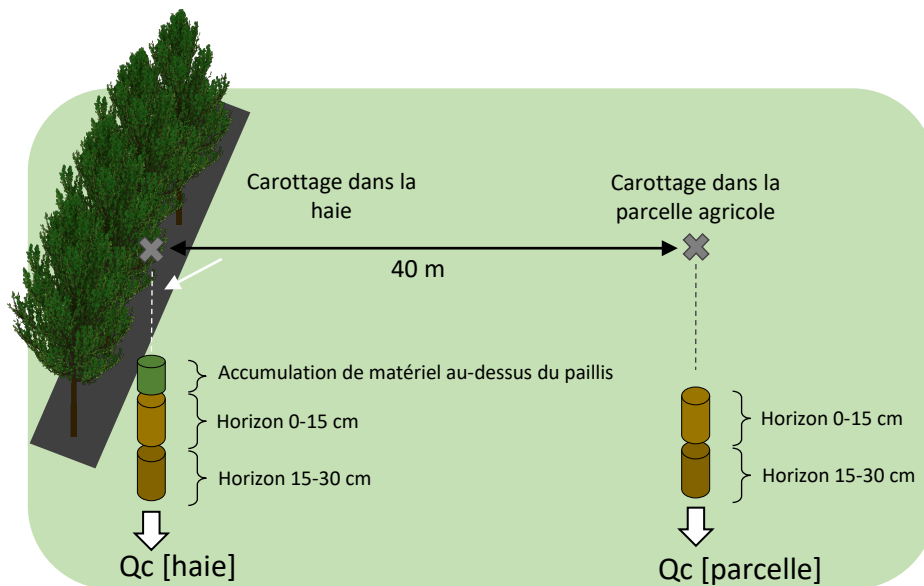


**Figure 1.** Mesures effectuées sur une section de haie brise-vent de 20 m de large (ici une haie composée de frêne blanc et d'épinette blanche).

#### b. Estimation du contenu en carbone du sol dans les haies brise-vent

Pour estimer le stock de carbone contenu dans le sol des haies, trois carottes de sol ont été prélevées à chaque point d'échantillonnage à l'aide d'une sonde volumétrique bipartite de 15 cm de longueur et de 8 cm de diamètre. Les trois carottes correspondaient : 1) à la litière accumulée au-dessus du paillis en plastique (ou dépôt de surface); 2) aux 15 premiers cm du sol sous le paillis (0-15 cm); et 3) à l'horizon compris entre 15 et 30 cm de profondeur (15-30 cm). Les points d'échantillonnage se trouvaient au milieu de deux des trois sections de chaque haie.

Deux carottes de sol (0-15 cm et 15-30 cm) ont aussi été prélevés à 40 m de distance de la haie dans la parcelle agricole adjacente avec la même sonde volumétrique afin d'en évaluer le contenu en carbone, et ainsi comparer les stocks de carbone du sol dans la haie à ceux dans les parcelles agricoles (Figure 2).



**Figure 2.** Présentation schématique du plan d'échantillonnage du sol pour comparer les stocks de carbone du sol dans les haies et dans les parcelles agricoles adjacentes. L'accumulation nette de carbone dans le sol sous la haie ( $\Delta Q_c$ ) par rapport à la parcelle agricole se calcule comme la différence entre la quantité de carbone dans les 3 horizons du sol de la haie ( $Q_c[\text{haie}]$ ) et la quantité de carbone dans les 2 horizons du sol de la parcelle agricole ( $\Delta Q_c = Q_c[\text{haie}] - Q_c[\text{parcelle}]$ ).

Chaque carotte de sol a ensuite été placée dans un sac en plastique et transportée au campus de l'UQAC. Les carottes ont ensuite été séchées à température ambiante pendant une semaine puis tamisées (maille de 2 mm). Les différentes fractions du sol (< 2 mm et > 2 mm) ont été pesées séparément puis broyées avec un broyeur à billes. Un sous-échantillon de 10 g de la fraction < 2 mm du sol a été prélevé puis mis à l'étuve à 105°C pendant 24 h pour déterminer l'humidité résiduelle des échantillons de sol. La biomasse racinaire contenue dans les carottes a été séchée à l'étuve pendant 48 h à 50°C avant d'être pesée et broyée au broyeur à billes.

La densité apparente effective du sol ( $\text{kg/m}^3$ ) a été calculée comme le rapport de la masse sèche de la fraction < 2 mm du sol contenue dans la carotte par le volume de la carotte.

La concentration en carbone organique du sol ( $\text{kg C/kg de sol}$ ) a été mesurée au laboratoire d'écologie terrestre de l'UQAC à l'aide d'un analyseur élémentaire (CHNS/O; modèle FlashSmart de Thermoscientific®) sur des sous-échantillons de 50 mg.

Le stock de carbone du sol jusqu'à 30 cm de profondeur (Stock C [0-30]) a ensuite été calculé de la façon suivante :

$$\text{Stock C [0-30]} \text{ (kg C/m}^2\text{)} = \sum [C]_i \times D_i \times H_i \quad (\text{équation 1})$$

Avec  $[C]_i$  : la concentration en carbone du sol de l'horizon  $i$  ( $\text{kg C/kg de sol}$ );  $D_i$  : la densité apparente effective du sol de l'horizon  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ ); et  $H_i$  : l'épaisseur de l'horizon  $i$ .

Le stock linéaire de carbone des haies ( $\text{t C/km}$ ) a été calculée de la manière suivante :

$$\text{Stock C (t C/km)} = \text{stock C [biomasse]} + \text{Stock C [0-30]} \times L \quad (\text{équation 2})$$

Avec stock C [biomasse] : le stock de carbone contenue dans la biomasse des arbres sur une longueur de haie de 1 km (t C/km); Stock C [0-30] : le stock de carbone du sol jusqu'à 30 cm de profondeur (kg C/m<sup>2</sup>); et L : la largeur de la haie (m).

c. Estimation du potentiel de séquestration du carbone des haies brise-vent sur le long terme

L'estimation des stocks linéaires de carbone des haies a aussi été réalisée par modélisation à l'aide de la version 4 du modèle Holos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (<https://agriculture.canada.ca/en/agricultural-production/holos>) dans le but d'estimer le potentiel de séquestration de carbone des haies 25, 50 et 75 ans après l'implantation des haies. Au préalable, les projections des stocks de carbone par Holos ont été comparées à celles mesurées sur le terrain pour évaluer la fiabilité du modèle.

**3) Effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures adjacentes**

Cet objectif n'a été atteint que partiellement car toutes les données ne nous ont pas été transmises par les producteurs agricoles. Nous sommes présentement en train de développer d'autres méthodes pour évaluer l'effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures adjacentes.

Néanmoins, nous avons mesuré l'impact d'une haie brise-vent sur le rendement d'une parcelle adjacente d'orge de la ferme Taillon à Saint-Prime. La haie brise-vent longeant la parcelle avait 18 ans au moment de la prise des mesures (plantée en 2003) et était composée de frêne blanc, épinette blanche, bouleau blanc et érable argenté. Nous avons mesuré la variation de la biomasse aérienne des plantes en fonction de la distance à la haie.

a. Échantillonnage

L'ensemble de la biomasse aérienne (mauvaises herbes + orge) à l'intérieur d'un quadrat de 830 cm<sup>2</sup> a été coupée à six distances de la haie (2, 5, 10, 20, 30 et à 80 m) sur 8 transects perpendiculaires à la haie et distants de 100 m les uns des autres (6 × 8 = 48 échantillons). Les biomasses ont été mises dans des sacs en plastique et rapportées à l'université. Comme pour le sol, nous postulons que les mesures à 80 m sont hors de la zone d'influence de la haie et représentent donc des valeurs témoins.

b. Mesure de la biomasse aérienne

Pour chaque sac de biomasse aérienne, les mauvaises herbes ont été séparées de l'orge. Les biomasses ainsi séparées ont ensuite été séchées (65°C pendant 48 h) puis pesées. Les grains d'orge ont ensuite été séparés du reste de la biomasse aérienne de l'orge et pesés. Les biomasses aériennes mesurées ont ensuite été converties en kg de matière sèche par hectare.

**4) Évaluation de la possibilité d'utiliser des sous-produits industriels pour la fertilisation des haies brise-vent**

Cet objectif a été atteint mais le suivi des haies brise-vent implantées sur le site de la bleuetière d'enseignement et de recherche (BER) dans le cadre de ce projet devra se



poursuivre sur plusieurs années afin de statuer clairement sur le potentiel fertilisant des sous-produits industriels à l'étude sur le long terme (biosolides de papetières et anhydrite).

a. Dispositif expérimental

Le test de fertilisation a été fait sur le dispositif expérimental installé à la Bleuetière d'enseignement et de recherche (BER) de l'UQAC à Normandin où 19 haies de pin rouge (4852 m au total; 48°48'11"N 72°38'26"O) ont été implantées en septembre 2020.

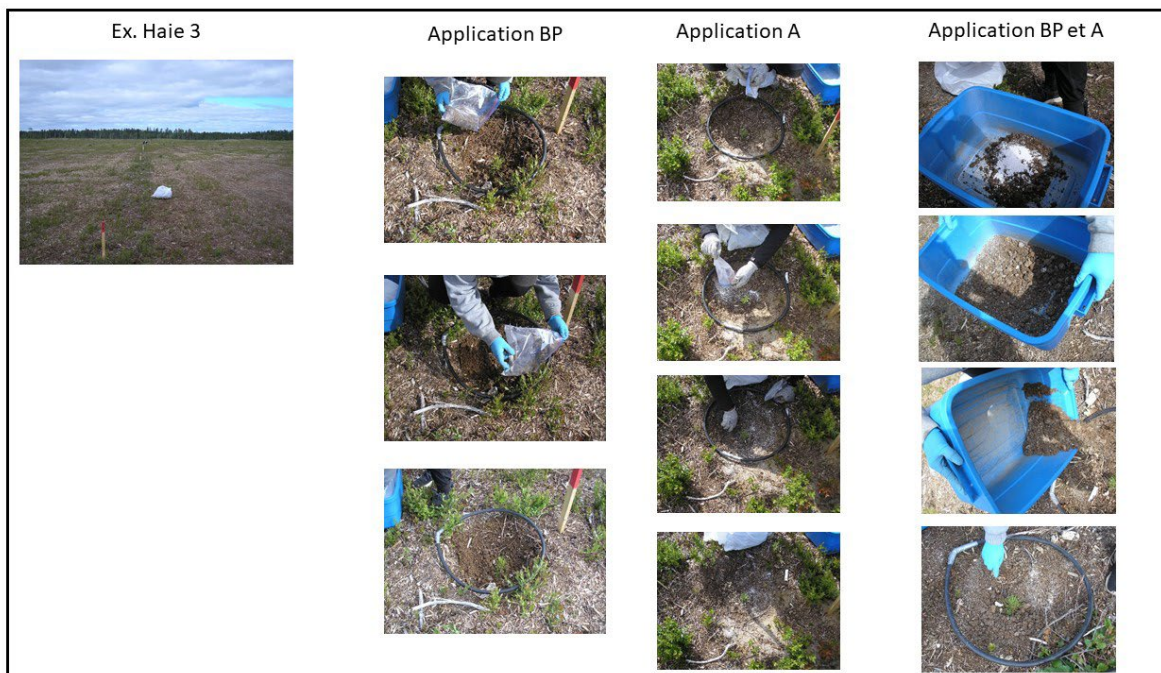
Le dispositif de fertilisation a été appliqué à partir de juillet 2021 sur quatre des 19 haies brise-vent (haies 3, 5, 7 et 9; Tableau A2.1) dans lesquelles nous avons modifié la composition des essences. Au pin rouge (PR), nous avons ajouté du pin blanc (PIB) et du mélèze (MEL).

Le dispositif de fertilisation, de type factoriel en blocs complets aléatoires, a été installé entre les 7 juin et 7 juillet 2021 et comprend trois variables indépendantes: 1) essences d'arbre (3 niveaux : pin rouge seul [PR]; combinaison de PR et mélèze laricin [PR-MEL]; combinaison de PR et pin blanc [PR-PIB]); 2) application de biosolides de papetières (2 niveaux : 0 kg N ha<sup>-1</sup> [T]; et 224 kg N ha<sup>-1</sup> [BP]); et 3) application d'anhydrite (2 niveaux : 0 kg A ha<sup>-1</sup> [T] et 5 000 kg A ha<sup>-1</sup> [A]). Les 12 traitements ont été répliqués dans quatre blocs (le bloc étant défini comme une haie brise-vent; Tableau A2.1) pour un total de 48 parcelles (12 parcelles par haie).

Chaque parcelle est constituée de 10 arbres espacés de 2,5 m; les arbres à l'extrémité de chacune des parcelles agissent comme tampon. Ainsi, huit arbres par parcelles sont mesurés pour tester l'effet de l'application des sous-produits industriels sur la productivité. Les combinaisons des espèces d'arbres sur les parcelles PR-MEL et PR-PIB ont été constituées en retirant les PR des parcelles pour les remplacer par du MEL ou du PIB (les PR retirés ont été plantés ailleurs sur la BER); les parcelles en combinaison ont les espèces différentes en alternance (exemple pour la combinaison PR-MEL : arbre 1 - PR, arbre 2 – MEL, arbre 3 – PR, arbre 4 – MEL, et ainsi suite pour compléter à 10 arbres par parcelle). Le remplacement des PR par le MEL a été effectué le 9 juin 2021 et celui des PR par le PIB a été effectué le 22 juin 2021. Au total, le dispositif comprend 384 arbres (à 8 arbres suivis par parcelle).

Les applications de biosolides de papetières (BP) et d'anhydrite ont été effectuées le 7 juillet 2021. Les BP ont été prélevés le 28 avril 2021 et apportés directement à la BER1 (pour un autre projet mais ces BP ont aussi été utilisés pour ce projet à la BER2); l'amas de BP a été déposé sur une pellicule en polythène épaisse et recouvert de cette même pellicule dans l'attente du moment d'application. Le calcul des quantités de BP à appliquer pour appliquer 224 kg N ha<sup>-1</sup> a été effectué en se basant sur une analyse d'un prélèvement effectué le 28 avril 2021 pour l'ajuster en fonction de la concentration en N total. L'anhydrite tamisée à < 1.27 cm (< 1/2") a été prélevée le 21 mai 2021; l'anhydrite était entreposée dans des chaudières en plastique étanches. Les sous-produits fertilisants ont été appliqués à la main, sans incorporation au sol, dans un rayon de 50 cm autour de chaque arbre (Figure 3). La dose d'application de BP pour atteindre 224 kg N ha<sup>-1</sup> a été justifiée par les doses utilisées dans une revue de littérature montrant qu'une dose de cet ordre était nécessaire pour mesurer des effets sur la productivité d'espèces d'arbres en forêt boréale (Newton and Amponsah 2006). De plus, un projet en cours du chercheur principal montre des résultats significatifs positifs sur la productivité d'une plantation de pin gris en forêt boréale avec une telle dose. Au meilleur de nos connaissances, des résultats de productivité sur l'application d'anhydrite sur des espèces d'arbres boréales n'ont pas été publiés. Ainsi, la dose d'anhydrite a été sélectionnée selon la pratique courante de fertilisation en milieu agricole; la

dose de 5 000 kg ha<sup>-1</sup> est aussi appliquée dans le projet en cours du chercheur principal sur la plantation de pin gris en forêt boréale.



**Figure 3.** Photos démontrant l'application de biosolides de papetières (BP) et d'anhydrite (A) sur les parcelles du dispositif installé à la BER en juillet 2021 pour tester l'effet de sous-produits industriels fertilisants sur la productivité du pin rouge, du mélèze laricin et du pin blanc en haies brise-vent.

*b. Mesure des indices de productivité*

Des mesures d'indices de productivité forestière ont été prises sur les arbres avant et après l'application des sous-produits : le diamètre à 2 cm de hauteur, la hauteur totale et la croissance apicale. Les mesures ont été prises avant l'application des sous-produits le 7 juillet 2021. Ensuite, les mesures ont été prises le 31 mai 2022 pour déterminer l'état des arbres en fin de saison de croissance 2021 et le 10 octobre 2022 et 26 septembre 2023 pour l'état des arbres en fin de saison de croissance en 2022 et 2023, respectivement. L'état des variables de productivité en fin mai et début juin d'une saison est le même qu'à la fin de la saison précédente puisque la croissance n'a pas encore débuté à ce moment de la saison. Ce principe est utilisé afin de bénéficier des ressources humaines au moment où elles sont disponibles dans ce projet, soit les assistantes et assistants de recherche étudiantes et étudiants normalement disponibles en été pour le travail de terrain. Les diamètres ont été mesurés avec un vernier. Les diamètres servaient à calculer la surface terrière des arbres (en cm<sup>2</sup>). La hauteur totale et la croissance apicale ont été mesurées avec un ruban à mesurer. L'augmentation de la croissance apicale entre les fins de saisons de 2021 à 2023 est calculée comme suit : variable calculée (en %) à partir de la croissance de l'année courante en lien avec la hauteur de l'année précédente (croissance apicale de l'année courante/hauteur de l'année précédente x 100). Le taux de survie des arbres a aussi été calculé en fins de saisons de 2021 à 2023.

### *c. Analyses statistiques*

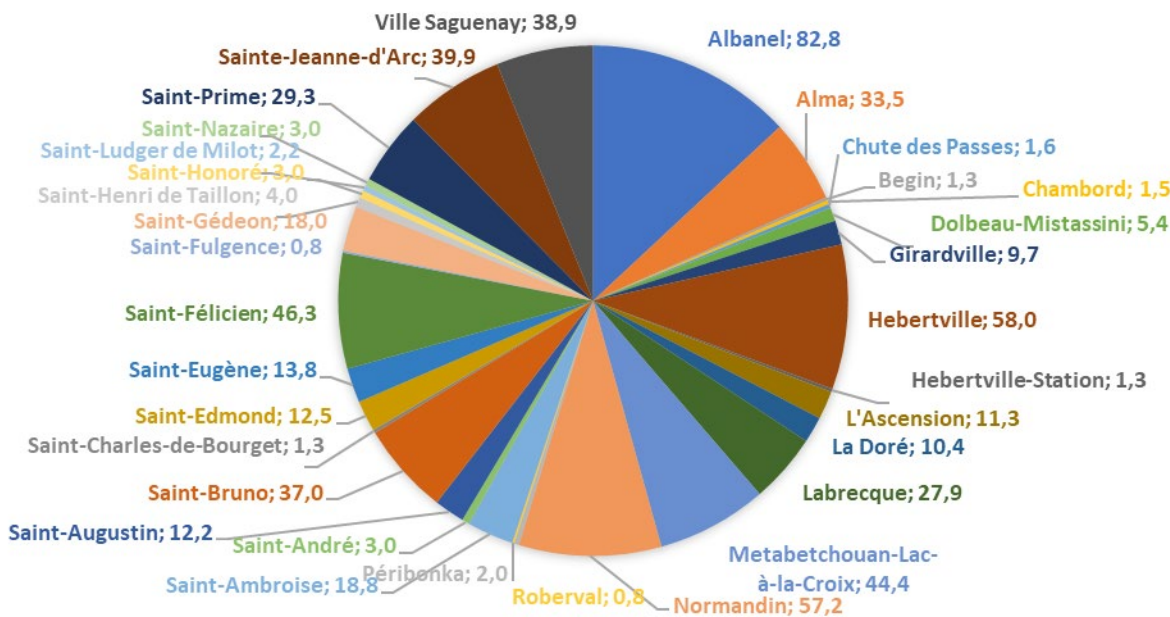
Les effets des traitements sur les indices de productivité de chaque année ont été testés par des analyses de variance (ANOVA) hiérarchisées effectuées avec la méthode des modèles mixtes de la procédure des modèles linéaires du logiciel JMP Pro (version 16.0 pour Windows, JMP de SAS Institute, Cary, NC, USA). Pour le PR, le modèle incluait l'application de BP, l'application d'anhydrite, la combinaison d'espèces et leurs interactions comme facteurs fixes, et le bloc et la parcelle (imbriquée dans les facteurs bloc, l'application de BP, l'application d'anhydrite et la combinaison d'espèces) comme facteurs aléatoires. Des tests posthoc HSD de Tukey ont été effectués pour toutes les variables si le facteur combinaison d'espèce avait un effet significatif. Pour le MEL et le PIB (étant toujours en combinaison avec PR), le modèle incluait l'application de BP, l'application d'anhydrite et leur interaction comme facteurs fixes, et le bloc et la parcelle (imbriquée dans les facteurs bloc, l'application de BP et l'application d'anhydrite) comme facteurs aléatoires. La parcelle (n = 4) était utilisée comme unité de réplification et les différences étaient considérées significatives avec un  $P < 0.05$ . Les variables étaient log-transformées lorsque nécessaire afin de respecter la condition d'homogénéité des variances de l'ANOVA.

## **RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS**

### **1- Caractérisation et typologie des haies de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean**

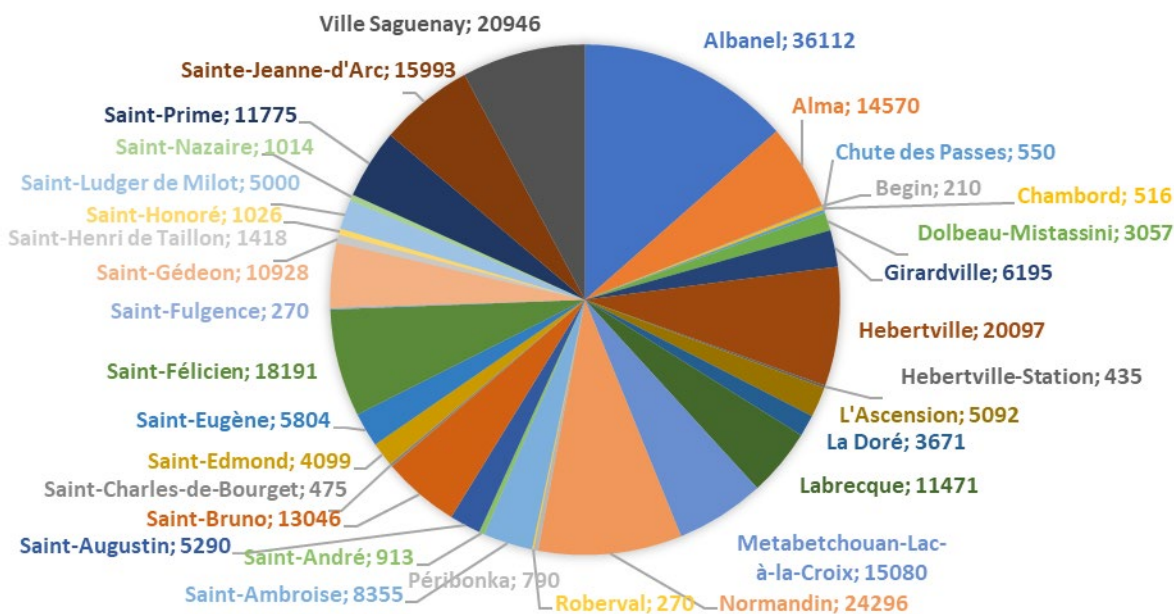
Au total, près de 633 km de haies brise-vent ont été implantés avec l'aide du MAPAQ dans 33 municipalités de la région du Saguenay-Lac Saint-Jean entre 2006 et 2017, représentant environ 267 000 végétaux (arbres, arbustes, petits arbres, espèces non-ligneuses pérennes). Albanel, Normandin, Hébertville et Saint-Félicien sont les municipalités où le plus gros effort de plantation a été fait, tant en termes du nombre de km de haies implantées (Figure 4) que du nombre de végétaux plantés (Figure 5).

## LONGUEUR DE HAIES (KM)



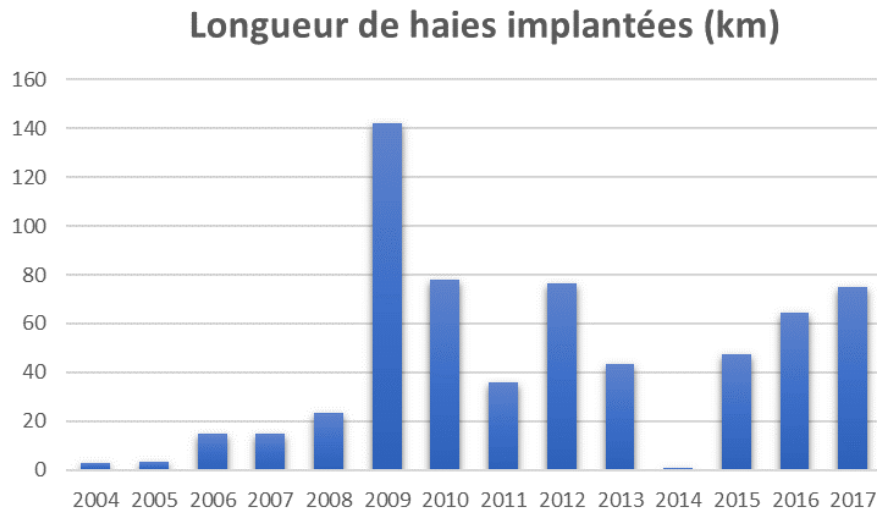
**Figure 4.** Longueur totale (km) des haies brise-vent implantées par le MAPAQ dans les 33 municipalités de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017.

## NOMBRE DE VÉGÉTAUX PLANTÉS



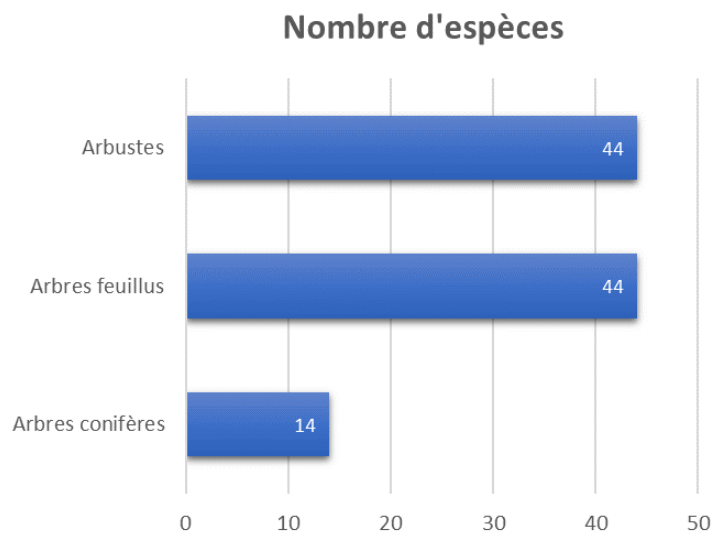
**Figure 5.** Nombre de végétaux plantés (arbres, arbustes, petits arbres, espèces non-ligneuses pérennes) dans les haies brise-vent implantées par le MAPAQ dans les 33 municipalités de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017.

Le plus gros effort de plantation a été fait en 2009 avec environ 140 km de haies implantées (Figure 6). Ces données indiquent qu'en 2030 environ 250 km de haies auront 20 ans et plus.



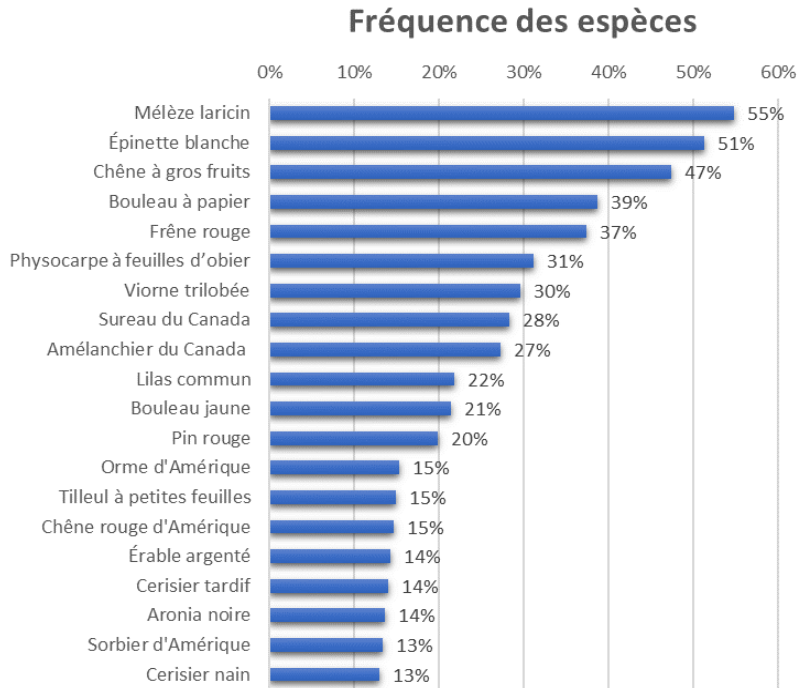
**Figure 6.** Longueur totale (km) des haies brise-vent implantées annuellement par le MAPAQ dans la région du Saguenay-Lac Saint-Jean entre 2004 et 2017.

La diversité spécifique des haies brise-vent qui ont été implantées dans la région entre 2006 et 2017 est élevée avec un total de 102 espèces (Annexe 3), dont 44 espèces d'arbustes, 44 espèces d'arbres feuillus et 14 espèces de conifères (Figure 7).

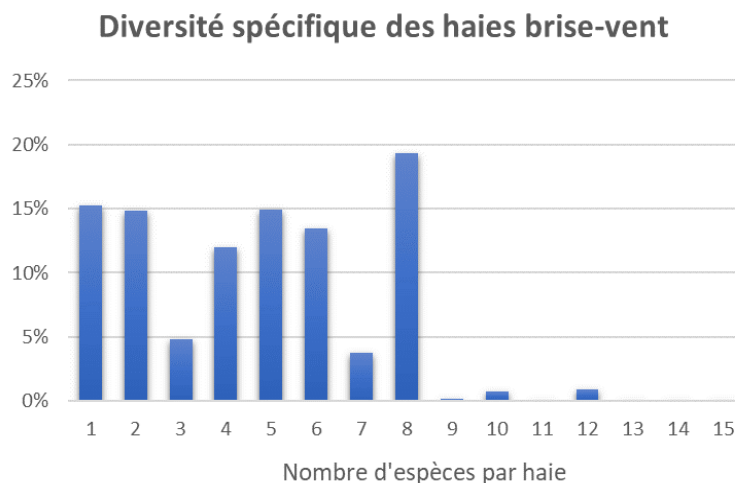


**Figure 7.** Nombre d'espèces composant les haies brise-vent implantées par le MAPAQ dans la région du Saguenay-Lac Saint-Jean entre 2006 et 2017.

Les trois essences les plus fréquemment plantées dans la région sont le mélèze laricin, l'épinette blanche et le chêne à gros fruits, qui sont présentes dans 55%, 51% et 47% des municipalités ayant bénéficié du programme (Figure 8). Les espèces arbustives les plus fréquentes sont le physocarpe à feuilles d'obier, la viorne trilobée et le sureau du Canada, présents dans environ un tiers des haies de la région. Seulement 15% de la longueur de haie implantée est monospécifique (Figure 9). Une importante proportion de haies (70%) contient trois espèces et plus.



**Figure 8.** Fréquence des 20 espèces les plus répandues dans les haies brise-vent implantées par le MAPAQ dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017.



**Figure 9.** Caractérisation de la diversité spécifique des haies brise-vent implantées par le MAPAQ entre 2006 et 2017 dans les exploitations agricoles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la longueur totale de haies implantées (633 km).

En conclusion, l'analyse de la base de données a permis de faire ressortir l'important effort d'implantation de haies brise-vent entre 2006 et 2017, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. L'importante diversité spécifique qui caractérise les haies de la région est certainement un facteur d'amélioration de leur résilience et de la qualité des habitats pour la faune sauvage, notamment les pollinisateurs (Workman et al. 2003; Climate Action Initiative 2013).

Les haies brise-vent présentent aussi un intérêt croissant pour leur potentiel de séquestration du carbone (Amichev et al. 2016; Mayrinck et al. 2019; Smith et al. 2021; Viaud and Kunemann 2021; An et al. 2022; Drexler and Don 2023). Elles représentent pour les exploitations agricoles un outil de réduction d'une partie de leurs émissions de gaz à effet de serre.

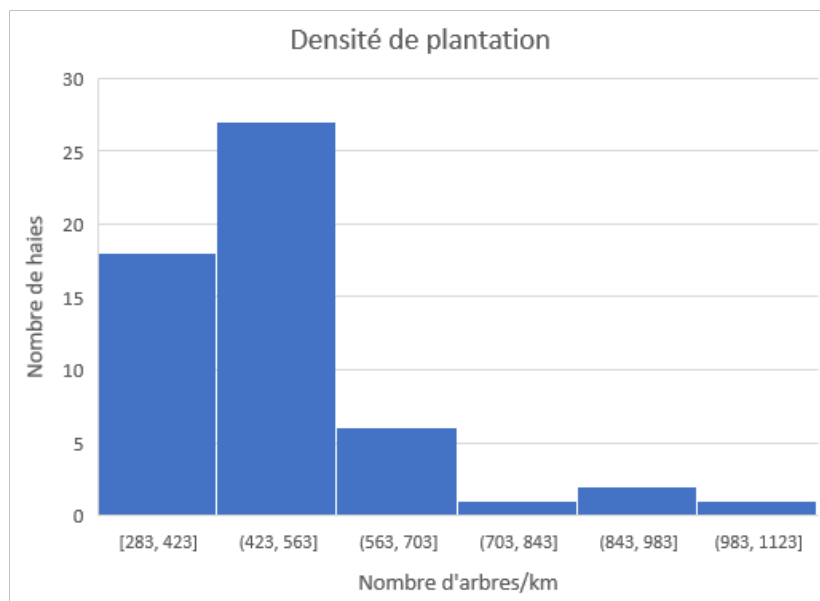
Nous avons sélectionné un sous-échantillon représentatif de 55 haies brise-vent dans 20 exploitations agricoles dispersées dans toute la région afin de mesurer leurs caractéristiques (espacement entre les arbres, nombre de rangées d'arbres) et celles des arbres qui les composent (croissance, mortalité). Ce travail de terrain avait également pour but d'évaluer les stocks de carbone dans la biomasse et dans le sol des haies. Nous avons également mesuré les stocks de carbone dans le sol des parcelles agricoles adjacentes afin de vérifier si les haies accumulent du carbone dans leur sol par rapport aux parcelles agricoles.

## **2- Mesure des stocks de carbone des haies et de leur potentiel de séquestration du carbone sur le long terme**

### *a- Profil des haies brise-vent échantillonnées*

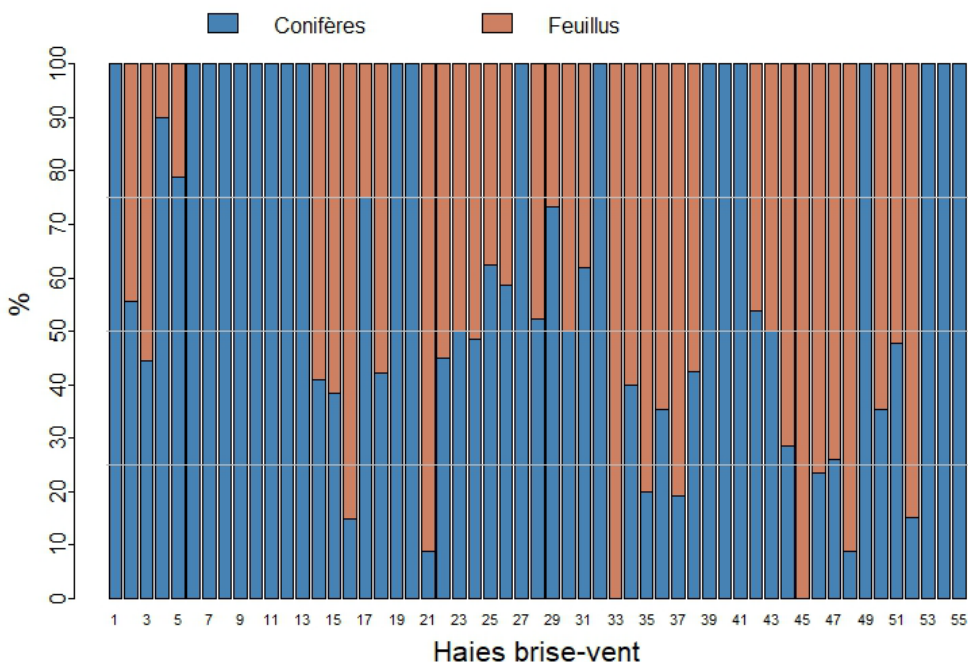
Au total, 1336 arbres et arbustes ont été mesurés dans 55 haies brise-vent de 20 fermes. Au total, ces 55 haies comprenaient 51 espèces d'arbres et arbustes. Les cinq essences les plus représentées dans les haies à l'étude sont le mélèze laricin (28 haies sur 55), l'épinette blanche (25 haies sur 55), le frêne rouge (16 haies sur 55), le peuplier hybride (10 haies sur 55) et le pin rouge (9 haies sur 55).

Seulement trois haies sur 55 avaient plus d'une rangée. La hauteur moyenne des haies variait de 1.3 m à 11.3 m (moyenne de  $5.4 \pm 2.4$  m). L'espacement moyen entre les arbres était faible, variant entre 0.93 et 3.3 m selon les haies (moyenne de  $2.1 \pm 0.5$  m). La densité de plantation d'arbres et arbustes dans les haies à l'étude variait de 283 à 1123 arbres par kilomètre (Figure 10). Environ 80% des haies avaient entre 283 et 563 arbres par kilomètre. Les trois seules haies avec plus de 843 arbres par kilomètre étaient composées de deux rangées.



**Figure 10.** Densité de plantation (nombre d'arbres par kilomètre de haie) dans les 55 haies brise-vent à l'étude.

L'échantillon de haies à l'étude comprenait 55% de haies dominées par des conifères, 40% de haies dominées par des feuillus et 5% de haies avec autant de conifères que de feuillus (Figure 11). Néanmoins, 36% des haies étaient composées uniquement de conifères contre seulement 4% de haies composées uniquement de feuillus. Néanmoins, plus de 60% des haies mixtes (composées de feuillus et de conifères) étaient dominées par les feuillus.



**Figure 11.** Proportions de conifères et de feuillus dans les 55 haies échantillonnées.



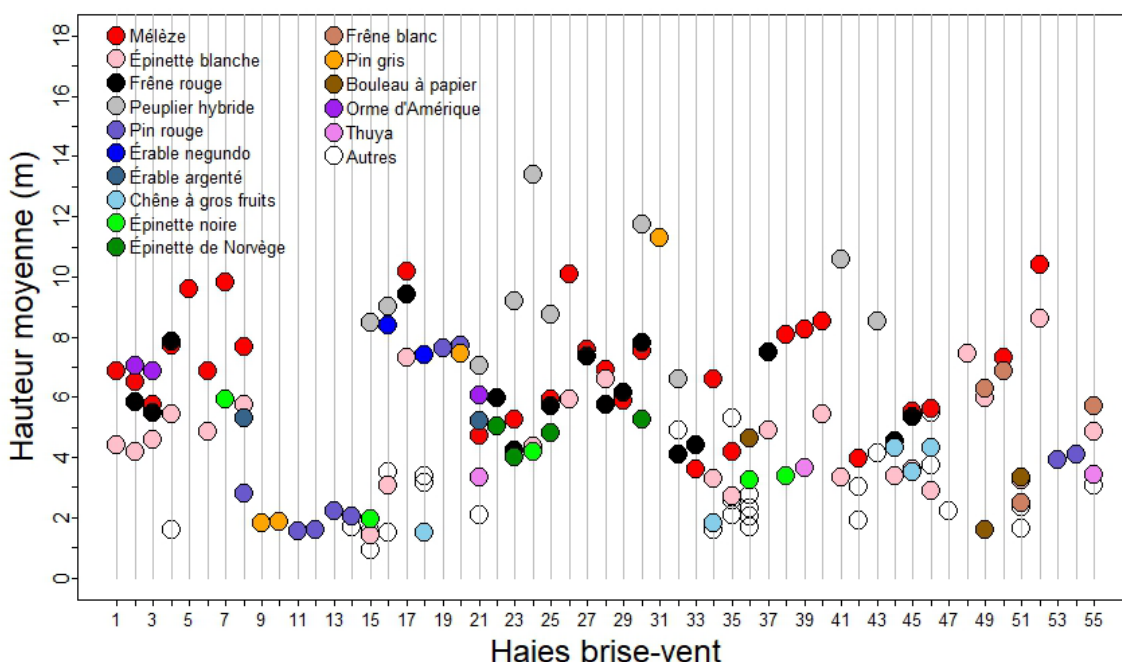
### b- Productivité des espèces

Le peuplier hybride est de loin l'essence avec le taux de croissance le plus élevé. Il a la plus forte hauteur (Figure 12), le plus fort DHP (Figure 13) et la plus forte biomasse (Figure 14) dans 100% des haies brise-vent plurispécifiques dans lesquelles il se trouve. Au moment de l'échantillonnage, sa hauteur était de 7% à 320% plus élevée et sa biomasse entre 50% et 14 000% plus importante que la deuxième espèce la plus productive présente dans la même haie.

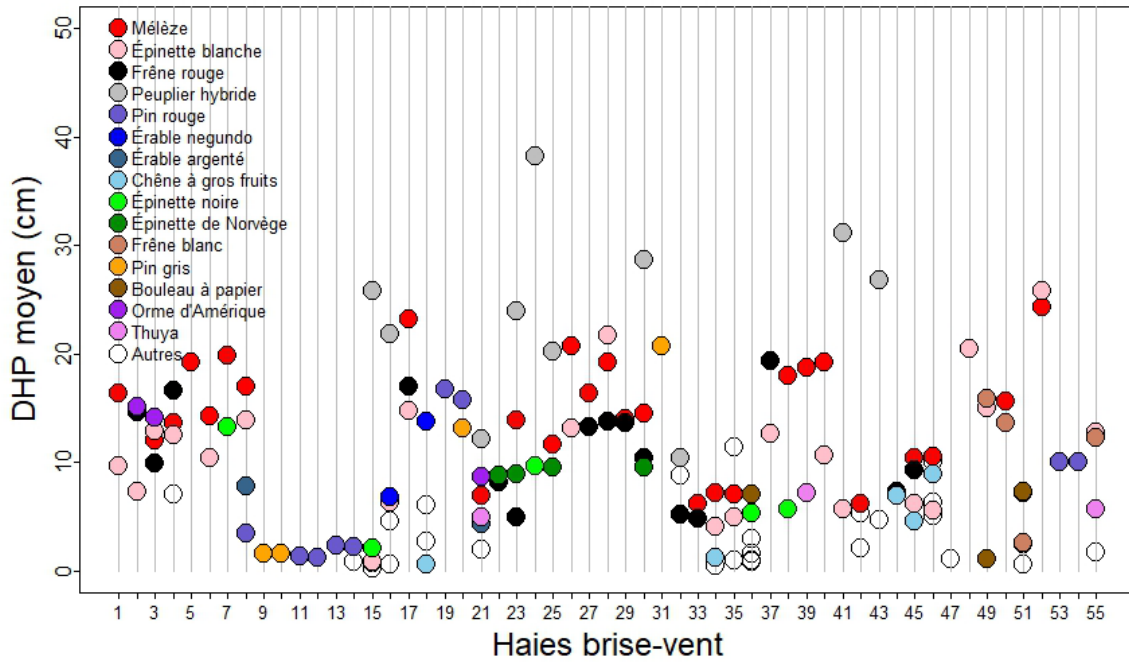
Le mélèze laricin, l'espèce la plus représentée dans les haies à l'étude (dans 28 des 55 haies), est aussi une essence à fort taux de croissance. Il a une croissance plus élevée que celles des autres essences associées dans plus de 60% des haies. Le mélèze avait une hauteur jusqu'à deux fois supérieure et une biomasse totale jusqu'à dix fois supérieure à celles des autres essences associées (ex : haies 34, 38 et 39; Figures 12 et 14).

L'orme d'Amérique et le bouleau à papier avaient des forts taux de croissance également mais étaient présents dans seulement 3 haies sur 55.

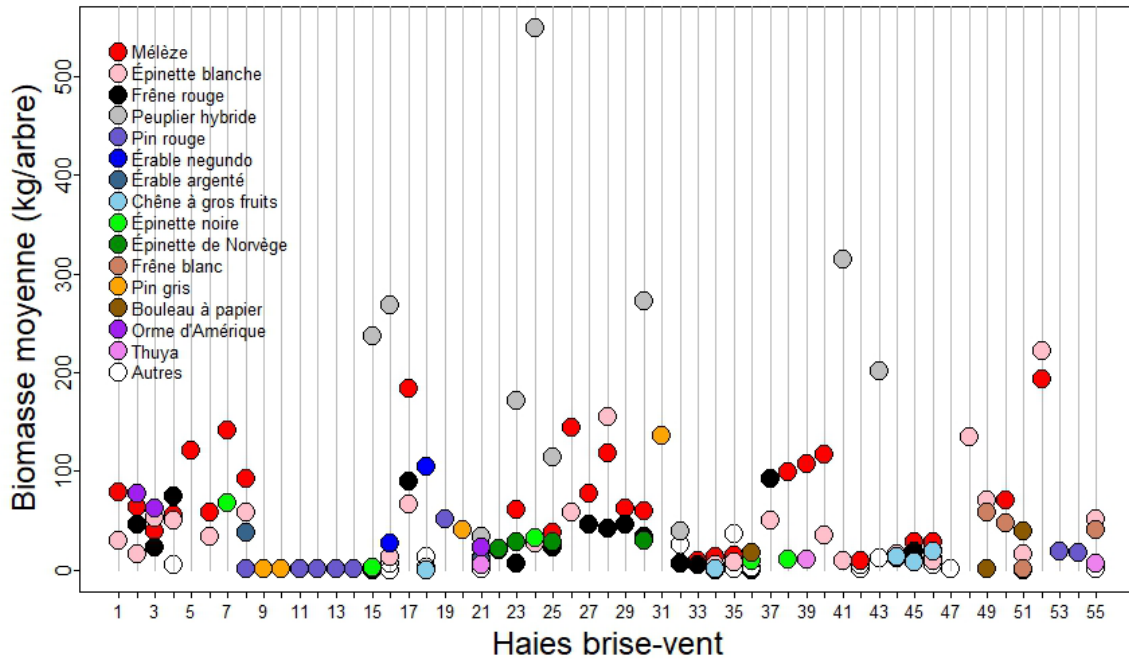
En revanche, l'épinette blanche, elle aussi très bien représentée dans les haies à l'étude (dans 25 des 55 haies), avait une croissance très lente en comparaison aux autres espèces associées dans la même haie. Dans environ la moitié de ces haies (13 haies sur 25; Figure 12), elle était l'espèce avec la plus faible hauteur (jusqu'à 85% plus faible que l'espèce dominante) et la plus faible biomasse (10 haies sur 25; Figure 14).



**Figure 12.** Hauteur moyenne (m) des 15 essences les plus courantes dans les 55 haies brise-vent à l'étude.



**Figure 13.** Diamètre moyen (m) des 15 essences les plus courantes dans les 55 haies brise-vent à l'étude.



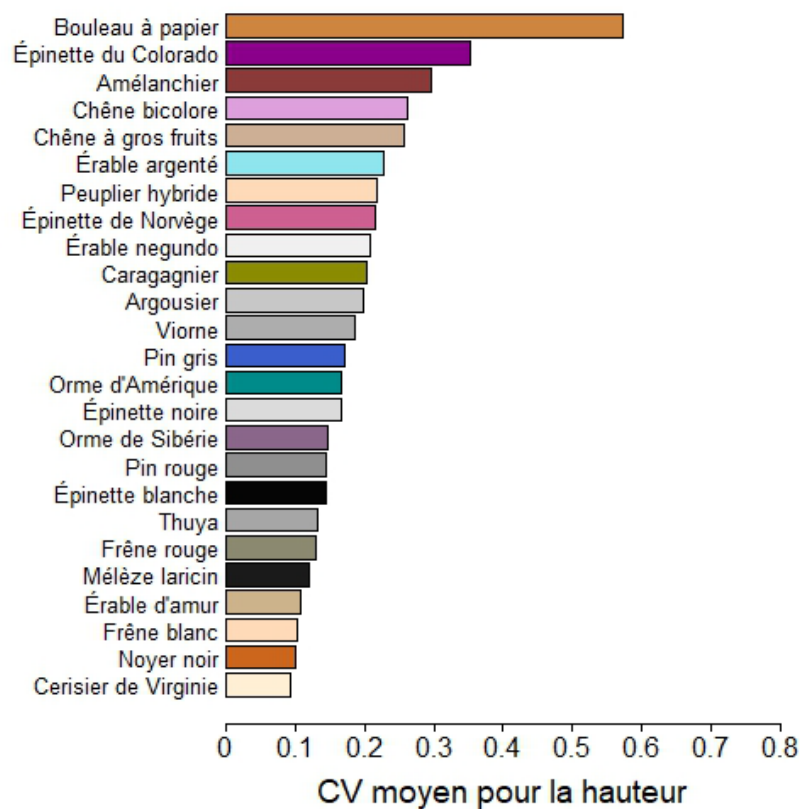
**Figure 14.** Biomasse moyenne par arbre (kg) des 15 essences les plus courantes dans les 55 haies brise-vent à l'étude.

### c- Variabilité de croissance des différentes espèces

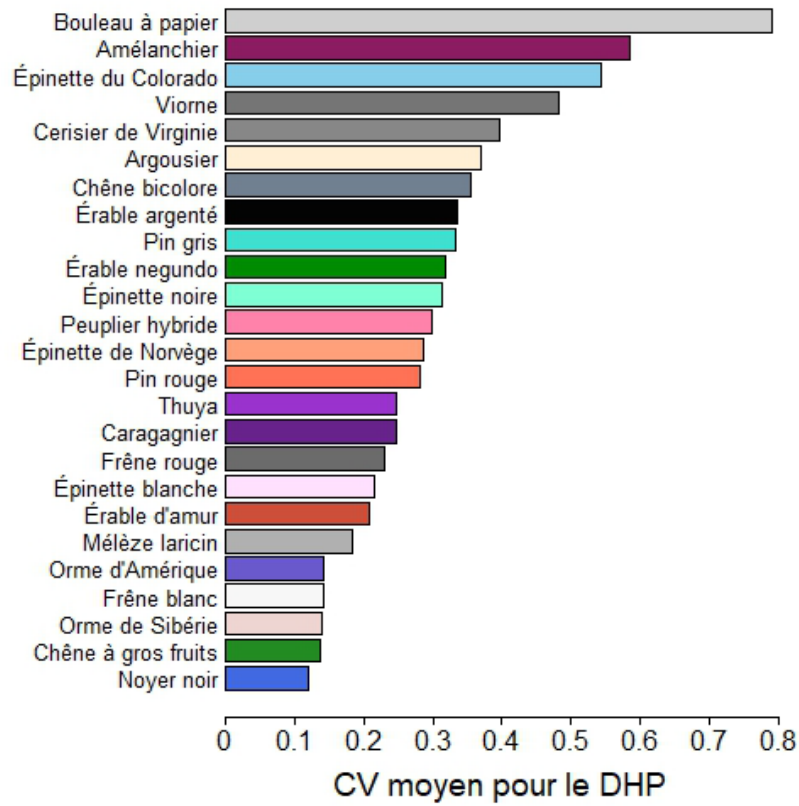
Connaître la variabilité des indices de croissance (DHP, hauteur, biomasse) entre les arbres d'une même espèce à l'intérieur d'une même haie (et donc de même âge) est important pour l'élaboration des plans d'échantillonnage des haies (nombre d'arbres à mesurer afin de s'assurer d'avoir un échantillon représentatif) (Kröbel et al. 2020) mais aussi pour la sélection des espèces à utiliser dans les haies. Il est en effet préférable de planter des essences dont la croissance et les dimensions varient le moins possible afin d'obtenir des haies homogènes.

Nous avons estimé la variabilité du DHP, de la hauteur et de la biomasse totale des arbres en calculant le coefficient de variation ( $CV = \text{Écart-type}/\text{moyenne}$ ) de ces trois variables dans chaque haie. Plus le CV est élevé plus la variabilité de la dimension en question (ex : DHP) varie d'un arbre à l'autre au sein d'une même haie.

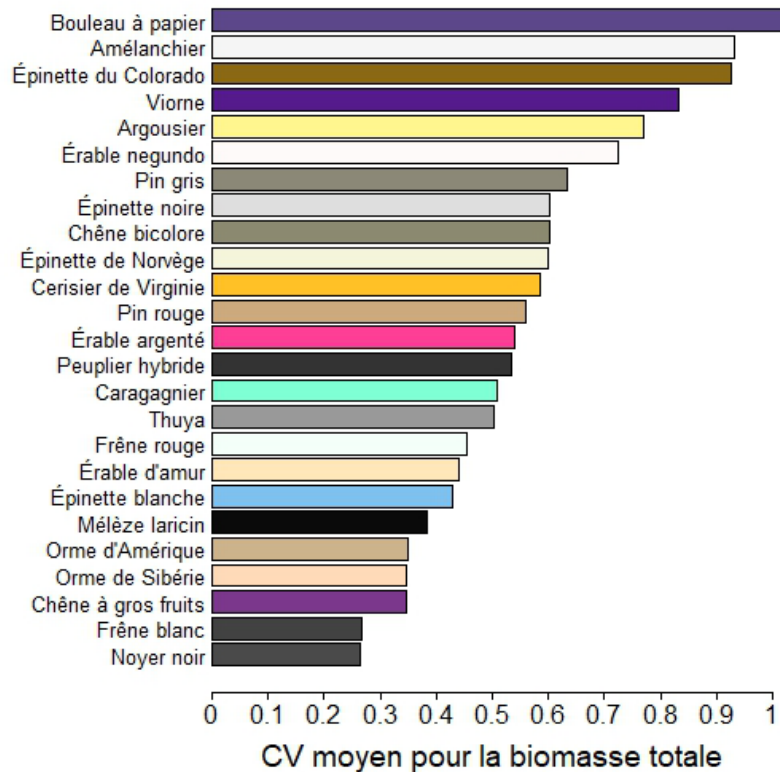
Nos résultats indiquent que la variabilité est généralement plus faible pour la hauteur (fourchette de 0.09 à 0.57 et moyenne de  $0.19 \pm 0.10$  à travers les espèces; Figure 15) que pour le DHP (fourchette de 0.12 à 0.79 et moyenne de  $0.31 \pm 0.16$  à travers les espèces; Figure 16). La variation est encore plus grande pour la biomasse des arbres (fourchette de 0.26 à 1.07 et moyenne de  $0.57 \pm 0.21$  à travers les espèces; Figure 17), ce qui est intuitif car la biomasse dépend non seulement du DHP et de la hauteur mais aussi de la forme de l'arbre (ex. nombre de branches, taux de défilement etc.).



**Figure 15.** Coefficient de variation (CV) pour la hauteur des arbres des espèces à l'étude à l'intérieur d'une même haie.



**Figure 16.** Coefficient de variation (CV) pour le DHP des arbres des espèces à l'étude à l'intérieur d'une même haie.



**Figure 17.** Coefficient de variation (CV) pour la biomasse totale des arbres des espèces à l'étude à l'intérieur d'une même haie.

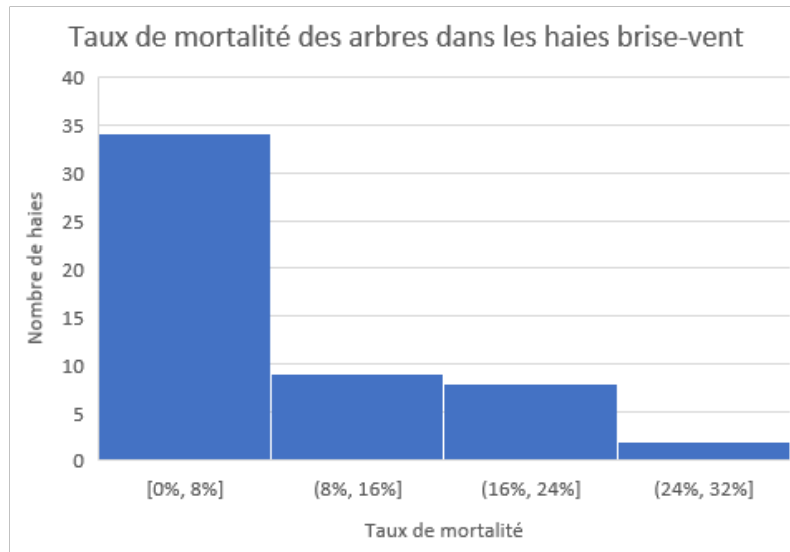
Certaines espèces, notamment le bouleau à papier, l'épinette du Colorado, l'amélanchier, le viorne et l'argousier semblent avoir une croissance particulièrement variable à l'intérieur des haies, ce qui indique que le nombre d'individus à échantillonner doit être élevé pour espérer avoir un échantillonnage représentatif. Au contraire, d'autres espèces comme les frênes (rouge, blanc et noir), les ormes (d'Amérique et de Sibérie), le mélèze laricin, l'épinette blanche et le chêne à gros fruits semblent avoir une croissance peu variable d'un arbre à l'autre. Ces espèces combinent un bon taux de croissance (notamment les ormes et le mélèze) et une faible variabilité, et sont donc de bons candidats pour les haies brise-vent de la région.

*d- Taux de survie des arbres dans les haies brise-vent échantillonnées*

Le taux de mortalité a été calculée par haie et non pour chaque espèce. En effet, bien qu'il fût facile sur le terrain de dénombrer le nombre d'arbres manquant dans les haies, il était souvent difficile d'identifier l'espèce manquante, particulièrement dans les haies à plus de deux espèces.

La grande majorité des haies échantillonnées (65%) avaient un taux de mortalité inférieur à 8% et seulement 19% des haies avaient un taux de mortalité compris entre 16 et 32% (Figure 18). En moyenne, le taux de mortalité des arbres s'élevait à 7.1% à travers les 55 haies à l'étude. Ce taux de mortalité est faible en comparaison de ceux qui sont utilisés dans le modèle Holos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et dans les haies de la province de la Saskatchewan (14.8-77.6%) (Kröbel et al. 2020).

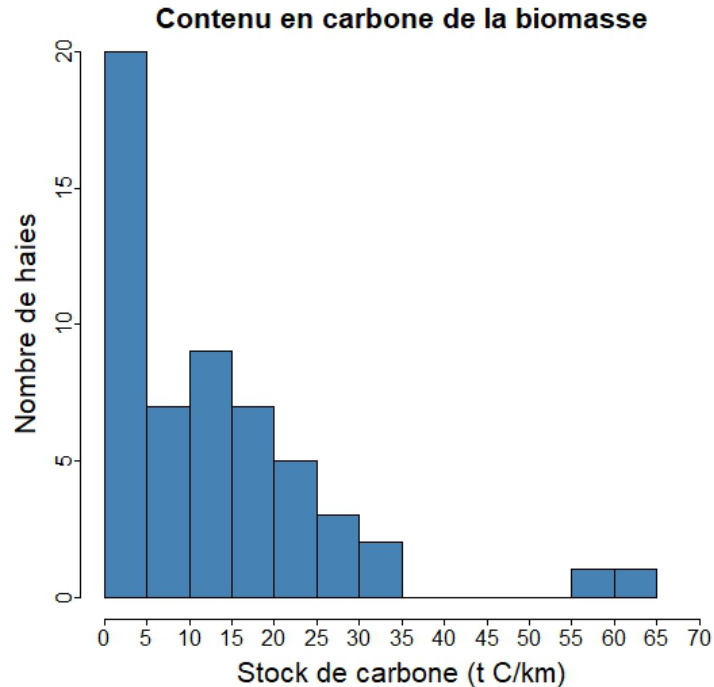
Le taux de coupe des arbres dans les haies était généralement très faible à part dans deux haies (composées d'épinette blanche et de mélèze) où celui-ci était supérieur à 60% en raison d'un espacement de plantation initial très faible (1 m). Un taux de coupe de 20% a aussi été observé sur une haie d'épinette blanche et de peuplier hybride dans une autre ferme pour la même raison.



**Figure 18.** Histogramme du taux de mortalité des arbres à travers les 53 haies brise-vent à l'étude.

*e- Stocks de carbone dans la biomasse des haies brise-vent*

Une grande proportion (35%) des haies avaient un contenu en carbone dans la biomasse très faible (< 5 t C /km) (Figure 19). Celles-ci correspondent à de jeunes haies (< 5 ans) de pin rouge et de pin gris dans des bleuetières, à des haies à forte proportions d'arbustes ou petits arbres, ou encore des haies mal entretenues (forte mortalité). Deux haies avaient des stocks de carbone supérieurs à 50 t C/km à l'année d'échantillonnage. Elles correspondent à des haies de pin gris matures pour l'une et d'un mélange de peuplier hybride, d'épinette blanche et d'épinette noire pour l'autre. En moyenne, le contenu en carbone de la biomasse des haies brise-vent était de 12.5 t C /km.

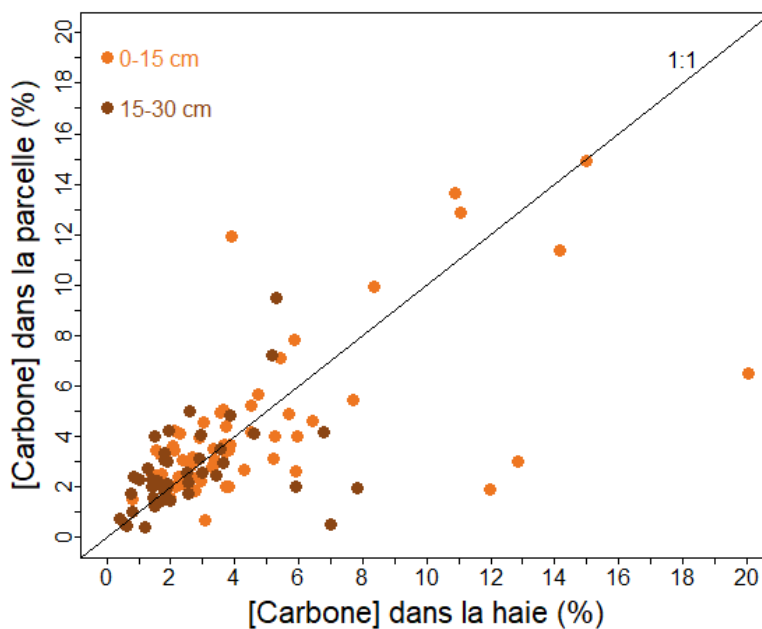


**Figure 19.** Histogramme du contenu en carbone de la biomasse (t C/km) des 55 haies brise-vent à l'étude.

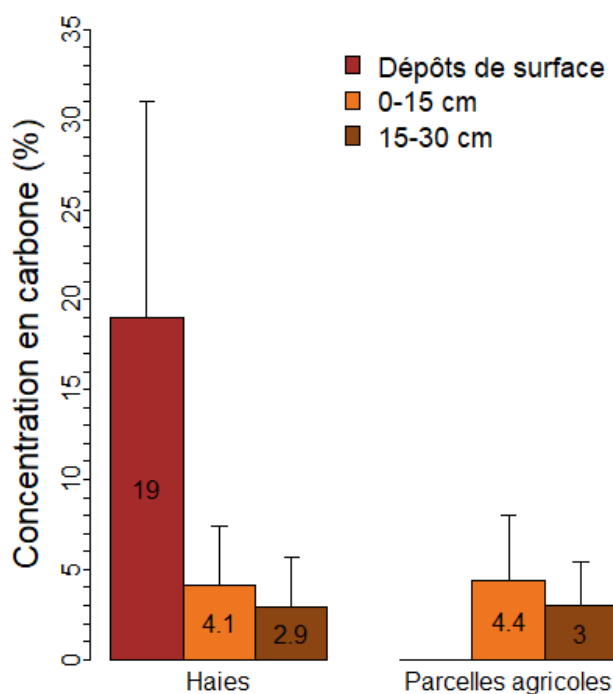
*f- Stocks de carbone dans le sol*

La concentration en carbone organique a été mesurée dans les horizons 0-15 cm et 15-30 cm du sol dans les haies brise-vent à l'étude et dans les parcelles agricoles adjacentes à une distance de 40 m de la haie. Les résultats indiquent que la concentration en carbone dans le sol des haies est relativement bien corrélée ( $r^2 = 0.26$ ;  $P < 0.05$ ) à celle dans les parcelles adjacentes (Figure 20). Celle-ci varie de 0,2% à 20%, avec environ 75% des valeurs inférieures à 4%.

En moyenne, la concentration en carbone du sol est similaire dans les haies et dans les parcelles, aussi bien pour l'horizon 0-15 cm que pour l'horizon 15-30 cm (Figure 21). Celle-ci est en moyenne légèrement, mais non significativement ( $P > 0.05$ ) supérieure dans l'horizon 0-15 cm (4.1-4.4%) que dans l'horizon 15-30 cm (2.9-3.3%). Ces concentrations sont par exemple plus élevées que celles dans des loams agricoles de l'ouest de la France qui variaient de 1.5% à 3% dans les 30 premiers centimètres (Viaud and Kunnemann 2021). Enfin, les dépôts de matériel organique et minéral observés à la surface du paillis des haies ont une concentration en carbone moyenne de 19%, avec néanmoins une grande variabilité d'une haie à l'autre. Ces dépôts sont dans certains cas exclusivement composés de litière provenant des arbres et de végétation herbacée (avec des concentrations en carbone autour de 50%) et dans d'autres d'un mélange de litière et de matériel minéral déplacé par le vent (avec des concentrations parfois  $< 5\%$ ).



**Figure 20.** Concentrations en carbone organique (%) dans les horizons 0-15 cm et 15-30 cm dans la haie (axe des x) et dans la parcelle agricole adjacente (axe des y).

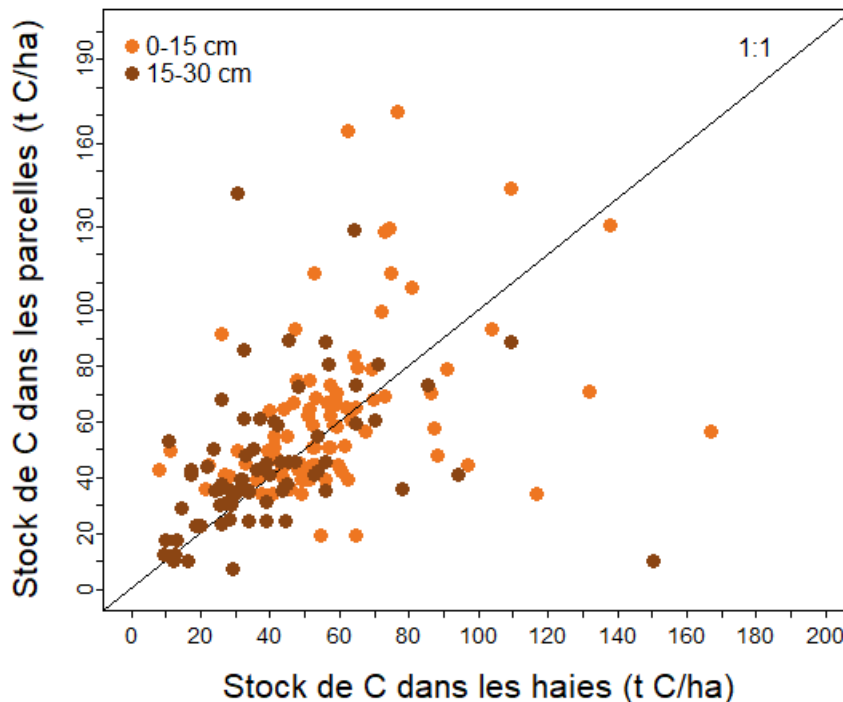


**Figure 21.** Concentrations en carbone organique dans les différents horizons (dépôts de surface, 0-15 cm et 15-30 cm) du sol des haies.

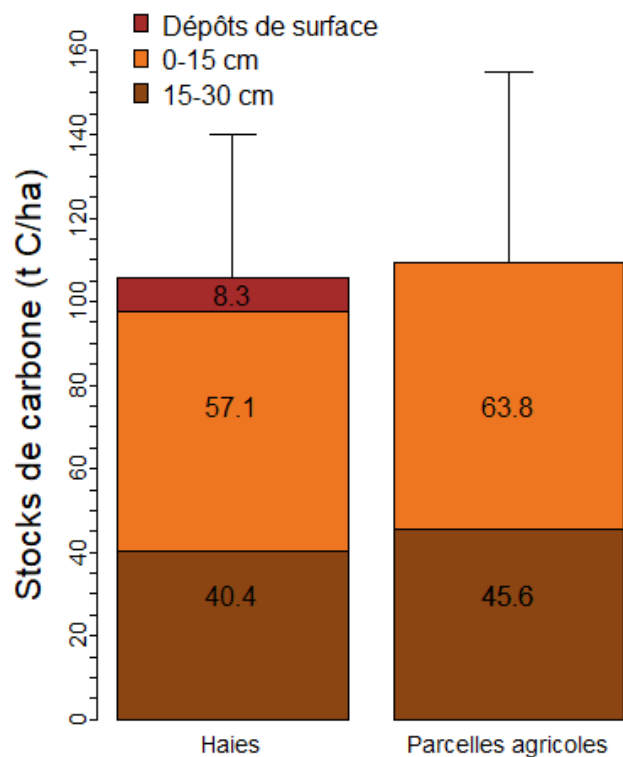


Les stocks de carbone dans les 15 premiers centimètres du sol (horizon 0-15 cm) varient de 10 à 180 t C/ha (Figure 22). Ces stocks sont légèrement supérieurs à ceux dans l'horizon situé plus en profondeur, entre 15 et 30 cm, qui varient entre 5 et 150 t C/ha (Figure 22). Les stocks dans les horizons du sol des haies sont relativement bien corrélés à ceux dans les parcelles agricoles adjacentes.

En moyenne, les stocks de carbone dans les 30 premiers cm s'élèvent à 105.8 t C/ha dans les haies et 109.4 t C/ha dans les parcelles agricoles adjacentes (Figure 23). Les stocks de carbone sont légèrement supérieurs dans les parcelles agricoles aussi bien pour l'horizon 0-15 cm (63.8 vs 57.1 t C/ha) que pour l'horizon 15-30 cm (45.6 vs 40.4 t C/ha). Cette différence s'explique en grande partie par une densité apparente plus élevée dans les parcelles agricoles, les concentrations en carbone du sol étant quasiment similaires dans les haies et les parcelles (Figures 20 et 21). En moyenne, 8.3 t C/ha s'est accumulé à la surface du sol dans les haies depuis leur implantation. Ces résultats indiquent que tous les sols n'ont pas encore récupéré tout le carbone qu'ils ont perdu suite à l'implantation des haies.



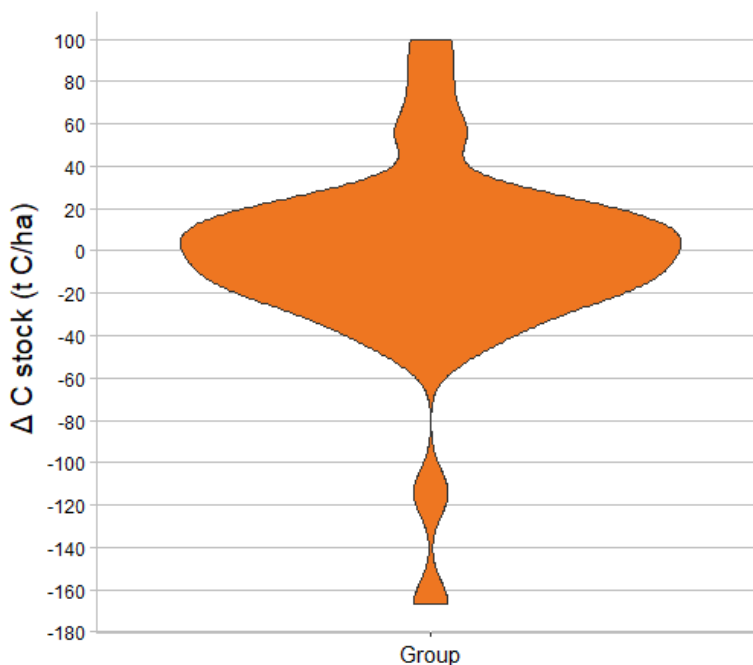
**Figure 22.** Stock de carbone (t C/ha) dans les horizons 0-15 cm et 15-30 cm du sol dans les haies (axe des x) et dans les parcelles (axe des y).



**Figure 23.** Stock de carbone (t C/ha) dans les différents horizons du sol des haies et des parcelles agricoles adjacentes.

Contrairement à nos hypothèses initiales, nous n'avons pas observé d'accumulation nette de carbone dans les haies par rapport aux parcelles agricoles adjacentes. La figure 24 montre que la différence de stock entre les haies et les parcelles agricoles ( $\Delta C$  stock) est soit positive (c'est-à-dire reflétant une accumulation nette de carbone dans la haie) soit négative (c'est-à-dire reflétant une perte nette de carbone dans la haie) selon les sections d'échantillonnage, mais que cette différence est dans une grande majorité des sites relativement faible (entre -20 et + 20 t C/ha), ce qui reflète l'hétérogénéité naturelle des sols (pierrosité, compaction etc.). Ce résultat peut s'expliquer par le jeune âge d'une majorité des haies à l'étude. Le stock de carbone des sols met du temps à se constituer et il faut parfois plusieurs décennies pour récupérer le carbone qui a été perdu du fait de la préparation mécanique ou chimique des sols (labour, hersage, désherbage etc.) (Mayer et al. 2020; Fradette et al. 2021). La présence d'un paillis en plastique à la surface du sol de la plupart des haies réduit aussi certainement les flux de carbone de la litière vers les horizons plus profonds du sol, où ce carbone peut se stabiliser. Ce résultat contraste néanmoins avec une récente étude conduite dans l'ouest de la France qui rapporte que les stocks de carbone dans la zone arable des sols agricoles sont en moyenne 20 t C/ha plus faible qu'en bordure de haie (Viaud and Kunnemann 2021). Cette étude a aussi montré que l'accumulation nette de carbone dans les haies augmentait avec l'âge des haies dans certains sites. On peut donc penser que sur le plus long terme, les sols des haies brise-vent vont accumuler du carbone, comme le prédisent les simulations faites à l'aide de modèles de bilan de carbone (par exemple Holos et MBC-SFC3).

À titre de comparaison, les stocks de carbone dans les 30 premiers centimètres des sols de notre étude sont 25-65% plus élevés que ceux de l'ouest de la France reportés par Viaud et Kunnemann (2021) (85 t C/ha à 1 m des haies et 63 t C/ha dans les parcelles agricoles).

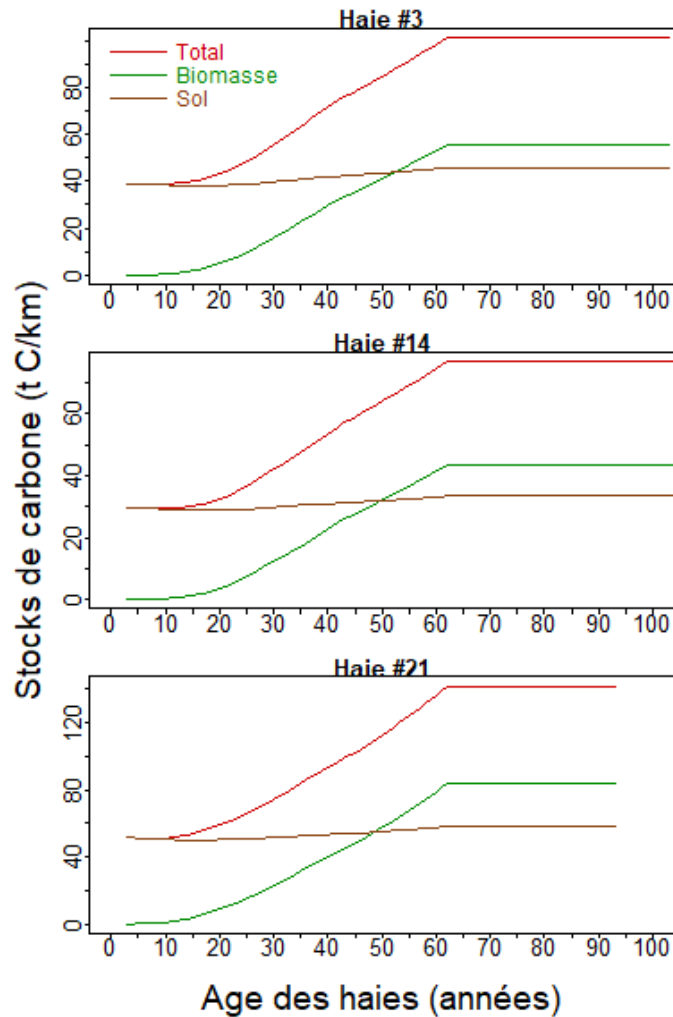


**Figure 24.**  $\Delta C$  stock de carbone total(i) (t C/ha) = stock dans la haie (i) – stock de carbone dans la parcelle adjacente (i)

#### *g- Potentiel de séquestration du carbone par les haies brise-vent sur le long terme*

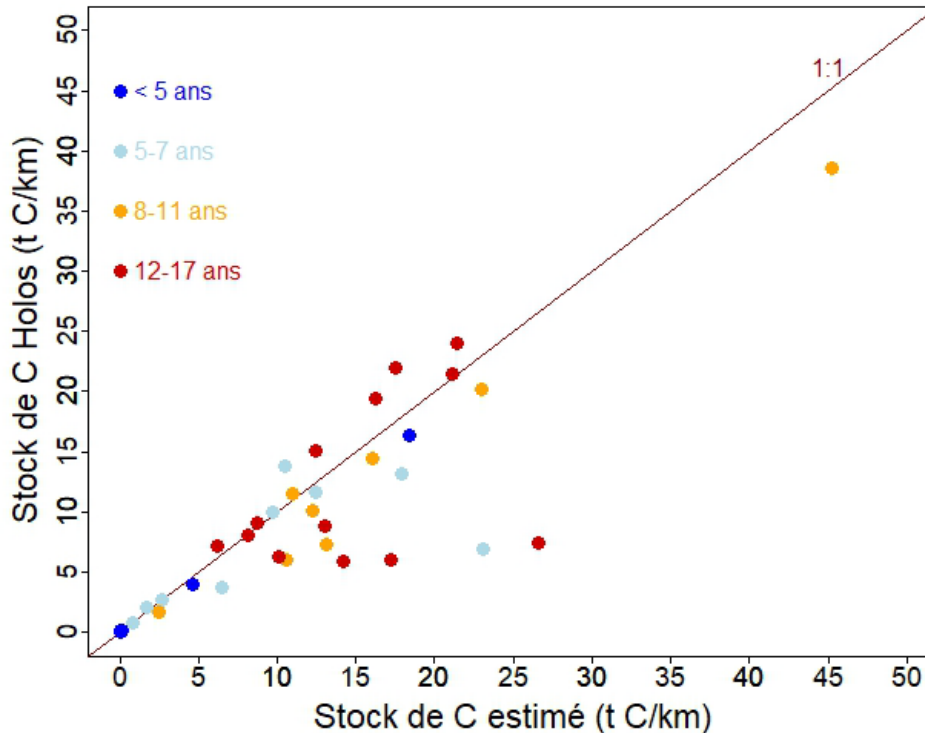
Des simulations des stocks de carbone dans la biomasse des arbres ont été réalisées à l'aide du modèle Holos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) pour les haies dont nous connaissons la date précise d'implantation. Trois exemples des projections des stocks de carbone obtenues sont présentés dans la Figure 25. Ces simulations indiquent que : 1) les stocks de carbone dans le sol à l'état initial (âge = 0) varient selon la localisation des haies en fonction du type de sol (sableux, argileux etc.); 2) que le stock de carbone dans le sol diminue légèrement au cours des deux premières décennies qui suivent l'implantation de la haie; 3) que le stock de carbone dans la biomasse augmente rapidement après 10 ans, se stabilise après 60-70 ans; et 4) que le stock total de carbone n'augmente pas avec l'âge des haies au-delà de 60-70 ans.

Nos résultats obtenus sur le terrain sont cohérents avec ces dynamiques. En effet, nous avons mis en évidence 1) que le sol des haies n'a toujours pas récupéré son stock de carbone d'avant l'implantation des haies en raison de leur jeune âge; et 2) que le stock de carbone de la biomasse varie significativement d'une haie à l'autre en fonction de leur composition spécifique, du taux de mortalité et de l'espacement entre les arbres.



**Figure 25.** Évolution des stocks de carbone dans la biomasse, dans le sol et dans l'ensemble de la haie au cours du temps pour 3 haies de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les simulations ont été réalisées à l'aide du modèle Holos d'AAC.

Nous avons comparé nos estimations des stocks de carbone dans la biomasse obtenues à partir des mesures prises sur le terrain et des équations allométriques pour les haies dont nous connaissons l'âge, avec les projections de Holos. Les résultats indiquent que les simulations du modèle sont cohérentes avec les estimations faites à partir des données de terrain (Figure 26). Le modèle Holos sous-estimait significativement le stock de carbone uniquement pour 4 haies.



**Figure 26.** Comparaison des estimations des stocks de carbone (t C/km) dans la biomasse des arbres à partir des mesures de terrain (axe des abscisses) et à partir du modèle Holos (axe des ordonnées) pour des haies de différentes classes d'âge.

Au vu de ces bonnes prédictions, nous avons utilisé Holos pour estimer les potentiels de séquestration de carbone dans la biomasse et le sol de 30 haies provenant de 18 exploitations agricoles sur les moyen (25 ans après implantation) et long termes (50 et 75 ans).

Les résultats indiquent que le potentiel de séquestration de carbone total (biomasse + sol) moyen s'élève à 20.3, 77.0 et 99.9 t C/km à 25, 50 et 75 ans, respectivement (Tableau 1). Ce potentiel de séquestration variait jusqu'à un facteur 10 entre les haies. Par exemple, à l'horizon 75 ans, le potentiel de séquestration est de 5.1 t C/km dans la haie #15 alors qu'il est de 597.3 t C/km dans la haie #20. L'accumulation de carbone dans la biomasse des arbres représente la grande majorité (> 90%) de ce potentiel de séquestration, particulièrement à l'horizon 25 ans, où le sol n'a, en moyenne, pas encore récupéré tout le carbone perdu suite à l'implantation de la haie (perte moyenne de 0.4 t C/km après 25 ans). Néanmoins, le modèle indique que toutes les haies accumulent du carbone dans leur sol à partir de 50 ans. Ce potentiel de séquestration peut atteindre plus de 20 t C/km dans certaines haies en 75 ans.

Le potentiel de séquestration du carbone dans la biomasse varie aussi très fortement entre haies et exploitations agricoles. Celui-ci varie de 4.3 à 564.8 t C/km à l'horizon de 75 ans. Cette importante variation est principalement due aux différences d'essences plantées, de taux de survie des arbres et d'entretien des haies (notamment le remplacement des arbres morts). Ces potentiels sont équivalents à des taux de séquestration de 0.06-7 t C/km et par an, ce qui est cohérent avec des estimations réalisées pour les haies des Prairies

canadiennes (1.7 à 6.5 t C/km et par an) (Amichev et al. 2016; Mayrinck et al. 2019) et pour l'ouest de la France (0.3-3.4 t C/ha et par an) (Viaud and Kunnemann 2021).

Globalement, on peut donc s'attendre à stocker environ 77 et 100 t C/km dans la région aux horizons de 50 et 75 ans après plantation, respectivement.

**Tableau 1.** Estimation des potentiels de séquestration de carbone (t C/km) de 30 haies brise-vent de 18 exploitations agricoles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean aux horizons de 25, 50 et 75 ans. Ces estimations proviennent de simulations réalisées avec le modèle Holos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) à partir de mesures biométriques prises sur le terrain.

#Ferme	#Haie	Biomasse (t C/km)			Sol (t C/km)			Total (t C/km)		
		25 ans	50 ans	75 ans	25 ans	50 ans	75 ans	25 ans	50 ans	75 ans
Ferme 1	#1	7,2	26,8	33,5	-0,1	2,3	3,2	7,1	29,1	36,7
Ferme 1	#2	12,2	39,0	48,4	0,3	4,5	5,8	12,4	43,5	54,2
Ferme 1	#3	13,4	44,7	55,5	0,2	4,9	6,4	13,6	49,6	62,0
Ferme 2	#4	2,5	7,6	9,6	0,1	0,8	1,0	2,6	8,4	10,6
Ferme 3	#5	1,6	4,4	5,5	0,0	0,3	0,4	1,6	4,7	6,0
Ferme 3	#6	5,6	15,1	18,8	0,0	1,2	1,6	5,6	16,3	20,5
Ferme 4	#7	19,2	59,6	73,4	0,1	5,2	7,2	19,3	64,8	80,5
Ferme 5	#8	8,9	23,8	29,5	0,1	1,8	2,4	9,0	25,6	31,9
Ferme 6	#9	6,2	20,8	27,0	-0,1	1,4	2,1	6,1	22,2	29,1
Ferme 7	#10	38,8	146,7	183,3	-2,6	10,4	15,0	36,2	157,1	198,3
Ferme 8	#11	24,9	86,1	107,4	0,0	8,8	11,6	24,9	94,8	119,0
Ferme 8	#12	36,9	168,0	227,0	-1,5	10,8	18,3	35,3	178,8	245,2
Ferme 9	#13	9,8	29,8	37,4	0,2	3,0	3,8	10,1	32,8	41,3
Ferme 10	#14	10,4	34,9	43,3	-0,3	2,4	3,5	10,0	37,3	46,8
Ferme 11	#15	1,2	3,8	4,7	0,0	0,3	0,4	1,2	4,1	5,1
Ferme 11	#16	3,5	9,7	11,9	0,1	1,0	1,3	3,6	10,6	13,2
Ferme 12	#17	62,3	209,8	260,4	-2,0	14,6	21,1	60,3	224,4	281,5
Ferme 12	#18	47,7	160,4	199,1	-1,5	11,2	16,1	46,1	171,6	215,3
Ferme 12	#19	105,4	309,7	356,1	-0,1	22,2	28,5	105,2	331,9	384,7
Ferme 12	#20	91,9	388,5	564,8	-7,2	12,7	32,5	84,7	401,2	597,3
Ferme 13	#21	19,5	63,9	83,5	-0,3	4,4	6,8	19,2	68,3	90,3
Ferme 14	#22	23,0	78,3	103,3	-0,8	2,9	5,8	22,2	81,2	109,2
Ferme 14	#23	21,2	76,9	95,5	-1,0	5,8	8,4	20,2	82,8	104,0
Ferme 15	#24	4,8	15,0	18,7	-0,1	1,3	1,8	4,7	16,3	20,4

Ferme 15	#25	5,6	17,0	21,4	0,0	1,3	1,9	5,6	18,3	23,3
Ferme 16	#26	5,1	14,7	17,3	0,1	1,4	1,8	5,2	16,1	19,1
Ferme 16	#27	17,9	71,8	92,4	3,9	4,6	4,8	21,8	76,4	97,2
Ferme 17	#28	1,2	3,5	4,3	0,1	0,4	0,6	1,2	3,9	4,9
Ferme 18	#29	8,9	24,3	30,5	0,0	1,8	2,5	9,0	26,1	32,9
Ferme 18	#30	4,1	11,3	14,1	0,0	0,8	1,1	4,1	12,1	15,3
<b>Moyenne</b>		<b>20,7</b>	<b>72,2</b>	<b>92,6</b>	<b>-0,4</b>	<b>4,8</b>	<b>7,3</b>	<b>20,3</b>	<b>77,0</b>	<b>99,9</b>
<b>Écart-type</b>		<b>25,8</b>	<b>93,1</b>	<b>124,3</b>	<b>1,6</b>	<b>5,2</b>	<b>8,4</b>	<b>24,9</b>	<b>97,9</b>	<b>132,5</b>



### 3- Effet des haies brise-vent sur les rendements des cultures adjacentes

Il est connu que le rendement des cultures peut être significativement réduit à proximité des haies en raison de l'ombrage, de la réduction de la disponibilité des nutriments et de l'humidité du sol, et de la production de composés allélopathiques (c'est-à-dire nocifs pour la croissance des autres espèces) (Kort 1988) (Figure 27). Nos résultats confirment ces observations sur une bande d'environ 5 m. Dans la parcelle à l'étude, la biomasse aérienne de l'orge était environ trois fois plus faible à 2 m de la haie qu'au centre de la parcelle (Figure 28). Il est cependant important de noter que ce très faible rendement en bordure de la haie ne résulte pas uniquement de la présence de la haie car c'est aussi une zone de passages fréquents des véhicules agricoles entraînant une forte compaction du sol.

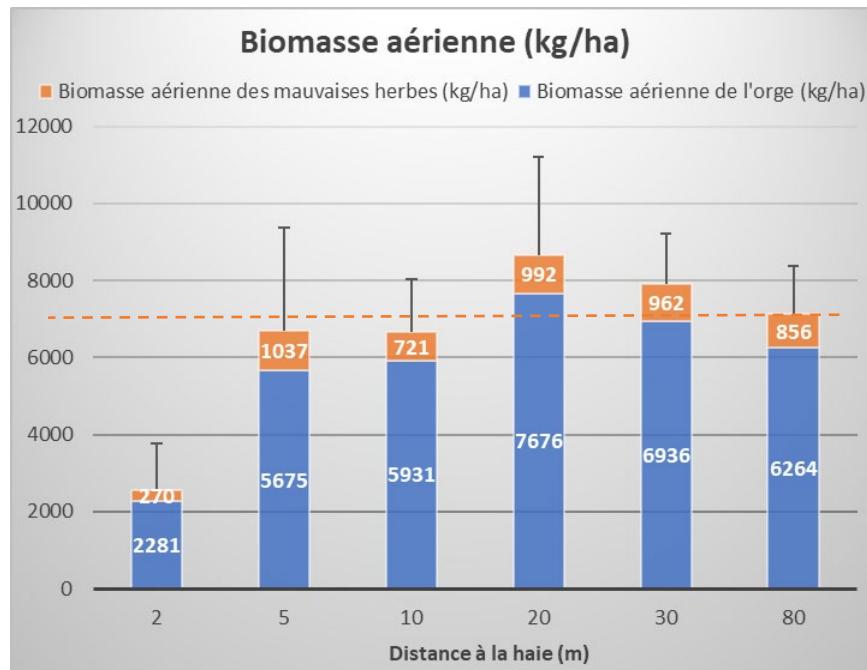


**Figure 27.** Réduction du rendement d'orge en bordure de haie brise-vent (2-5 mètres de large) causée par l'ombrage et la compétition pour l'eau et les nutriments (cadre orange = zone de compétition). Lorsque la porosité de la haie est trop faible, cette baisse de rendement peut aussi être due à un démarrage plus tardif de la croissance au printemps en raison d'une accumulation de neige en bordure de haie.

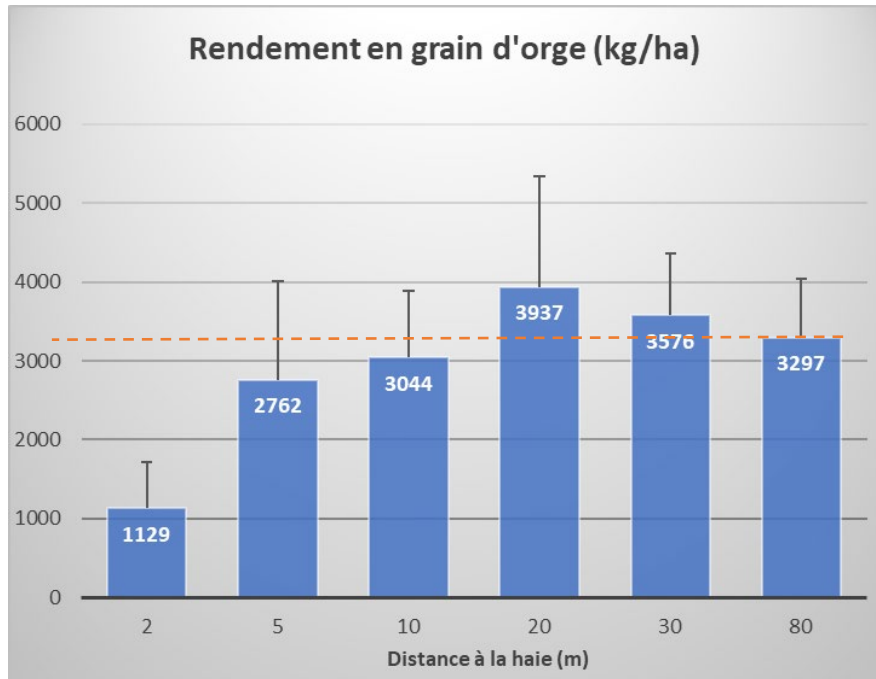
En revanche, des recherches ont montré que des gains de rendements significatifs peuvent avoir lieu dans le reste de la parcelle, les plus gros gains de rendement ayant généralement lieu à l'intérieur d'une bande équivalente à 10 fois la hauteur de la haie (10 H) en aval et de 3 H en amont (Baldwin 1988; Kort 1988). Une étude récente conduite au Kansas et au Nebraska (États-Unis) a montré que le soja et le blé étaient les cultures les plus avantagées par la présence de haies, avec des augmentations de rendement jusqu'à 16% dans 30 à 46% des cas (Osorio et al. 2019). Ces augmentations de rendement compensaient la perte de surface cultivée due à la présence de la haie (Osorio et al. 2019). En règle générale, une haie est économiquement rentable lorsque sa surface ne dépasse pas 6% de la surface de la parcelle (Brandle et al. 2004). Dans notre parcelle d'étude, le maximum de production de biomasse aérienne de l'orge se situait à 20 m de la haie (environ 4 H), avec une valeur

moyenne (7 676 kg/ha) environ 20% supérieure à celle au centre de la parcelle (à 80 m de la haie). La biomasse aérienne des plantes indésirables était aussi environ trois fois plus faible à 2 m de la haie que dans le reste de la parcelle.

De la même manière, le rendement en grain d'orge augmentait de la bordure de la haie jusqu'à une distance de 20 m pour y atteindre un pic de 3 937 kg/ha, une valeur 20% supérieure à celle au centre de la parcelle (3 297 kg/ha) (Figure 29). Le rendement à 2 m de la haie était quasiment trois fois plus faible qu'au centre de la parcelle et quasiment quatre fois plus faible qu'à 20 m. Le rendement à 5 et 10 m était légèrement inférieur (8 à 16%) à celui au centre de la parcelle. Si on postule que le rendement à 80 m de la haie est hors de l'influence de la haie (>10H), alors nos résultats suggèrent que la haie diminue le rendement d'en moyenne 20% dans les 10 m longeant la haie brise-vent, mais l'améliore jusqu'à 20% entre 20 et 30 m de distance. Lorsque l'on inclut la perte totale de production sur la surface des haies (3 m de largeur), la diminution moyenne de rendement s'élevait à environ 30% sur 10 m. Nos données suggèrent donc que les pertes de rendement dans la bande de compétition de 10 m sont certainement compensées par les gains de rendement dans le reste de la zone d'influence de la haie, ce qui corrobore les résultats de Osorio et al. (2019).

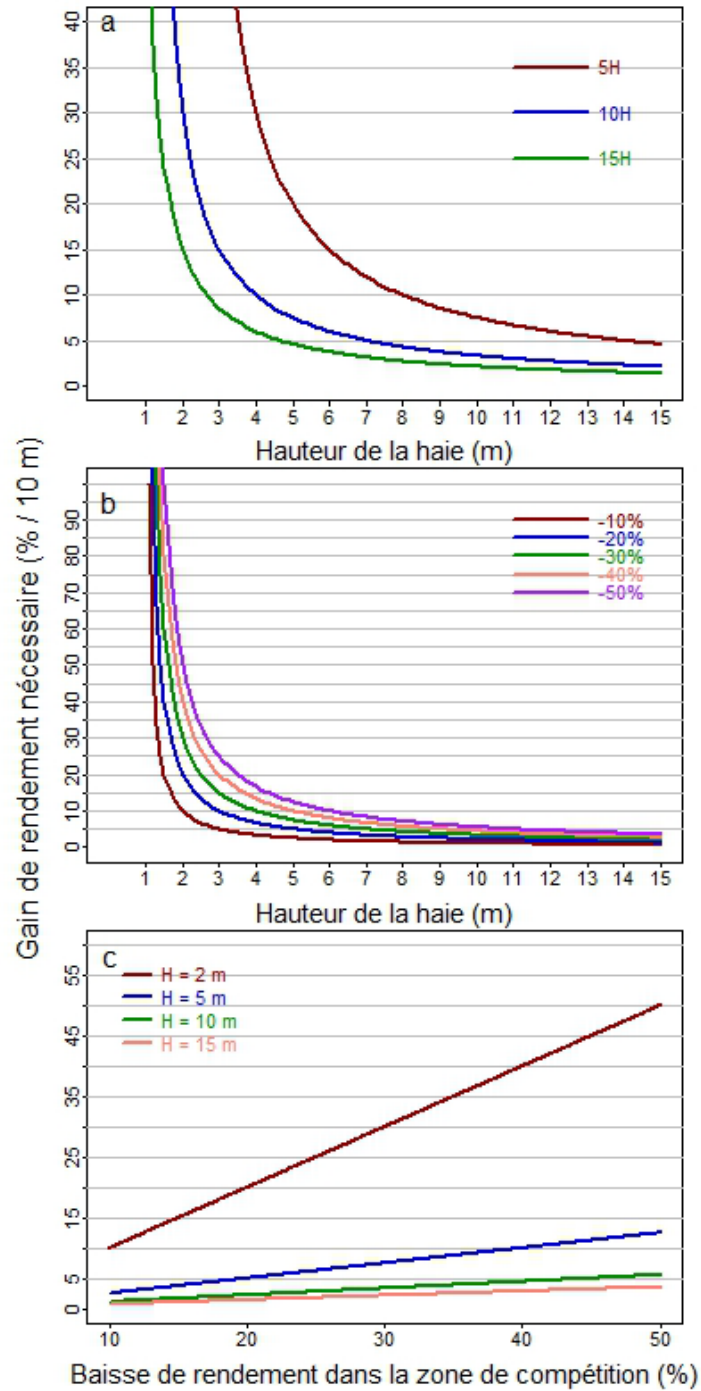


**Figure 28.** Biomasse aérienne totale (orge + mauvaises herbes) par unité de surface (kg de matière sèche/ha) en fonction de la distance à la haie brise-vent. La ligne en pointillés rouge indique la valeur témoin (aucun effet de la haie).



**Figure 29.** Masse de grain d'orge par unité de surface (kg de matière sèche/ha) en fonction de la distance à la haie brise-vent. La ligne en pointillés rouge indique la valeur témoin (aucun effet de la haie).

Nous avons réalisé des simulations numériques pour décrire le changement du gain de rendement nécessaire dans la zone d'influence de la haie (%) pour compenser la perte de rendement dans la zone de compétition en fonction de la hauteur des haies. En théorie, les pertes de rendement dans la bande de compétition sont d'autant plus facilement compensables que la zone d'influence de la haie est importante et que la hauteur de la haie est grande (Figure 30). Par exemple, si la zone d'influence de la haie est de 10 H et la hauteur de la haie est de 5 m, cela signifie que la perte de 30% de rendement devra être compensée sur une zone de 40 m de largeur (soit +7.5% de rendement par bande de 10 m). Si la haie mesure 8 m, alors les 30% de perte de rendement devront être compensés sur une zone de 70 m de largeur (soit +4.3% par bande de 10 m de largeur) (**Figure 30a**). Quelle que soit la perte de rendement dans la zone de compétition, la hauteur de la haie diminue fortement les gains de rendement nécessaires dans le reste de la zone d'influence de la haie pour compenser les pertes enregistrées dans la zone de compétition (**Figure 30b**). Cette diminution est d'autant plus importante que la zone d'influence de la haie est importante (**Figure 30a**). De la même manière, on voit que quelle que soit la diminution du rendement dans la zone de compétition, l'augmentation de la hauteur de la haie permet de diminuer considérablement les gains de rendements nécessaires dans le reste de la zone d'influence de la haie (**Figure 30c**).



**Figure 30.** Relations théoriques a) entre la hauteur de la haie brise-vent et les gains de rendements nécessaires dans la zone d'influence de la haie (5H, 10H ou 15H) pour compenser une perte de rendement de 30% dans la bande de 10 m bordant les haies brise-vent (zone de compétition); b) entre la hauteur de la haie brise-vent et les gains de rendements nécessaires dans la zone d'influence de la haie (10H) pour compenser des pertes de rendement de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% dans la zone de compétition de 10 m de largeur; et c) la baisse de rendement dans la zone de compétition de 10 m de largeur et les gains de rendements nécessaires dans la zone d'influence de la haie (10H) pour compenser ces pertes pour des haies de 2 m, 5 m, 10 m et 15 m de hauteur.

Afin de maximiser l'effet des haies sur le rendement, il est par conséquent recommandé de planter des haies 1) de faible largeur (1 rang); 2) avec des essences dont la croissance est rapide et un enracinement profond plutôt que latéral; et 3) espacées de 10 à 15 fois la hauteur maximale anticipée de la haie (10H ou 15H).

#### **4- Évaluation de la possibilité d'utiliser des sous-produits industriels pour la fertilisation des haies brise-vent**

Il est d'abord important de démontrer l'effet de l'hétérogénéité naturelle du site avant l'application des traitements de BP et d'anhydrite. Pour les trois essences d'arbres plantées (pin rouge [PR], mélèze laricin [MEL] et pin blanc [PIB]), l'hétérogénéité naturelle du site n'avait aucun effet sur la surface terrière et la hauteur totale avant l'application des traitements (Tableaux 2 à 5). L'application de BP et d'anhydrite ont en revanche significativement affecté la surface terrière, la hauteur totale, la croissance apicale et l'augmentation de croissance apicale après seulement la deuxième saison de croissance en 2022 (Tableaux 2 à 5). Les effets étaient différents selon les espèces.

**Tableau 2.** Moyennes ( $\pm$  erreur standard; n = 4) d'indices de productivité du pin rouge (PR) avant et après l'application des traitements sur des haies brise-vent de la BER de l'UQAC. Les traitements : applications de biosolides de papetières (sans – T, application de 224 kg N ha<sup>-1</sup> – BP) et d'anhydrite (sans – T, application de 5 000 kg ha<sup>-1</sup> – A) et combinaison des espèces (PR seul, PR avec le mélèze laricin – PR-MEL, PR avec le pin blanc – PR-PIB).

Moment de l'année	Application de BP	Application d'anhydrite	Combinaison d'espèces	Indices de productivité					
				Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>	
				cm <sup>2</sup>	cm	cm	%	%	
Juillet 2021 : avant l'application	T	T	PR	0.1 (0.01)	8.7 (0.5)				
			PR-MEL	0.1 (0.01)	11.4 (0.9)				
			PR-PIB	0.1 (0.01)	9 (0.6)				
	BP	A	PR	0.1 (0.01)	10.6 (0.6)				
			PR-MEL	0.11 (0.01)	9.4 (0.8)				
			PR-PIB	0.09 (0.01)	11.5 (0.6)				
		T	PR	0.1 (0.01)	11.5 (0.5)				
			PR-MEL	0.11 (0.01)	10.9 (0.6)				
			PR-PIB	0.1 (0.01)	10.9 (0.6)				
	A	PR	0.09 (0.01)	10.5 (0.5)					
		PR-MEL	0.1 (0.01)	10.1 (0.8)					
		PR-PIB	0.09 (0.01)	11.3 (0.7)					
2021 : fin de saison de croissance	T	T	PR	0.19 (0.01)	8.9 (0.5)			100 (0)	
			PR-MEL	0.2 (0.01)	11.5 (0.7)			100 (0)	
			PR-PIB	0.2 (0.02)	9.2 (0.5)			100 (0)	
			PR	0.23 (0.01)	10.6 (0.5)			100 (0)	
			PR-MEL	0.21 (0.02)	9.5 (0.8)			100 (0)	
			PR-PIB	0.19 (0.02)	11.4 (0.6)			100 (0)	
	BP	T	PR	0.21 (0.01)	11.4 (0.5)			97 (3)	
			PR-MEL	0.24 (0.02)	10.8 (0.6)			100 (0)	
			PR-PIB	0.21 (0.02)	11 (0.6)			100 (0)	
		A	PR	0.22 (0.02)	10.1 (0.5)			97 (3)	
			PR-MEL	0.2 (0.01)	9.8 (0.7)			100 (0)	
			PR-PIB	0.22 (0.01)	10.7 (0.6)			100 (0)	
	2022 : fin de saison de croissance	T	T	PR	0.22 (0.02)	15.3 (0.9)	6.4 (0.7)	76.4 (9.8)	100 (0)
				PR-MEL	0.27 (0.03)	17.7 (1.3)	6.1 (1)	56.1 (10.8)	100 (0)
				PR-PIB	0.26 (0.04)	16 (1.3)	7.7 (1)	84.9 (10.1)	100 (0)
				PR	0.37 (0.04)	16.6 (1.2)	6.3 (0.9)	64.1 (10.3)	100 (0)
				PR-MEL	0.26 (0.04)	15.4 (1.5)	7 (1.4)	84.3 (20)	100 (0)
				PR-PIB	0.25 (0.04)	16.3 (1.2)	4.9 (0.9)	43.6 (7.7)	100 (0)
BP	T	PR	0.28 (0.02)	18.6 (1)	7.4 (0.8)	67.7 (7.3)	97 (3)		
		PR-MEL	0.35 (0.06)	19.8 (1.8)	9.8 (1.5)	91.3 (12.9)	100 (0)		
		PR-PIB	0.34 (0.04)	18.3 (1.3)	7.3 (1.1)	68.4 (11.7)	100 (0)		
	A	PR	0.32 (0.04)	17.7 (1.3)	7.6 (1)	78.5 (10.3)	97 (3)		
		PR-MEL	0.23 (0.02)	14.9 (1.6)	5.5 (1.3)	62.6 (15.8)	100 (0)		

Moment de l'année	Application de BP	Application d'anhydrite	Combinaison d'espèces	Indices de productivité				
				Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
				cm <sup>2</sup>	cm	cm	%	%
2023 : fin de saison de croissance	T	T	PR-PIB	0.24 (0.04)	15.7 (1.4)	5 (1.4)	50.9 (14.8)	100 (0)
			PR	0.63 (0.07)	23.8 (1.6)	8.3 (1)	58.4 (8)	97 (3)
			PR-MEL	0.72 (0.09)	28.5 (3.5)	11.7 (2.3)	59.2 (9)	100 (0)
			PR-PIB	0.63 (0.1)	23.3 (1.8)	7.1 (1.3)	47.8 (9)	88 (7)
			PR	0.69 (0.12)	22.7 (2.4)	7.5 (1.5)	44 (6.9)	100 (0)
			PR-MEL	0.59 (0.08)	19.9 (2.3)	6.2 (1.2)	41.2 (7.6)	94 (6)
	BP	T	PR-PIB	0.63 (0.12)	24.6 (3)	9.8 (2.3)	59.4 (12.8)	94 (6)
			PR	0.82 (0.09)	27.2 (1.8)	9.1 (1.1)	48.4 (6.1)	94 (4)
			PR-MEL	0.96 (0.2)	30.1 (3.8)	10.3 (2.3)	46.6 (9)	100 (0)
			PR-PIB	0.9 (0.14)	25.5 (2.5)	7.3 (1.8)	39.3 (9.9)	88 (7)
		A	PR	0.85 (0.14)	25.3 (2.4)	7.9 (1.3)	41.6 (5.9)	97 (3)
			PR-MEL	0.48 (0.1)	22.4 (2.8)	9.7 (1.9)	74.1 (14.3)	100 (0)
			PR-PIB	0.59 (0.1)	22.1 (2.4)	7.6 (1.5)	50.5 (11.6)	88 (7)

<sup>a</sup>La croissance apicale se détermine par défaut à la 2<sup>e</sup> saison de croissance suivant la saison d'application des traitements.

<sup>b</sup>Le taux de survie se détermine en fin de saison et se compare au moment avant l'application des traitements.

**Tableau 3.** Valeurs de P des ANOVA testant les effets avant et après l'application des traitements sur le pin rouge (PR) des haies brise-vent de la BER de l'UQAC. Les traitements : applications de biosolides de papetières (sans – T, application de 224 kg N ha<sup>-1</sup> – BP) et d'anhydrite (sans – T, application de 5 000 kg ha<sup>-1</sup> – A) et combinaison des espèces (PR seul, PR avec le mélèze laricin – PR-MEL, PR avec le pin blanc – PR-PIB).

Source	Indices de productivité – Valeurs de P				
	Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
<b>Juillet 2021 : avant l'application</b>					
Variable log transformée	Non	Non	-	-	-
BP	0.7666	0.0813	-	-	-
Anhydrite	0.6362	0.7145	-	-	-
Combinaison d'espèces	0.4697	0.8022	-	-	-
BP × Anhydrite	0.4466	0.14	-	-	-
BP × Combinaison d'espèces	0.8775	0.4794	-	-	-
Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.9979	0.0567	-	-	-
BP × Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.8966	0.1493	-	-	-
<i>HSD Tukey</i>					
Combinaison d'espèces	-	-	-	-	-
PR vs PR-MEL	-	-	-	-	-
PR vs PR-PIB	-	-	-	-	-
PR-MEL vs PR-PIB	-	-	-	-	-
<b>2021 : fin de saison de croissance</b>					
Variable log transformée	Non	Non	-	-	Non
BP	0.258	0.2039	-	-	0.1729

Source	Indices de productivité – Valeurs de P				
	Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
Anhydrite	0.7784	0.7569	-	-	1
Combinaison d'espèces	0.8978	0.7494	-	-	0.1596
BP × Anhydrite	0.3899	0.0472	-	-	1
BP × Combinaison d'espèces	0.9379	0.3751	-	-	0.1596
Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.2947	<b>0.0367</b>	-	-	1
BP × Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.5247	0.0601	-	-	1
<i>HSD Tukey</i>					
Combinaison d'espèces	-	-	-	-	-
PR vs PR-MEL	-	-	-	-	-
PR vs PR-PIB	-	-	-	-	-
PR-MEL vs PR-PIB	-	-	-	-	-
<b>2022 : fin de saison de croissance</b>					
Variable log transformée	Oui	Non	Non	Non	Non
BP	0.2709	0.1363	0.2558	0.8129	0.1729
Anhydrite	0.5759	0.0789	<b>0.0255</b>	0.0795	1
Combinaison d'espèces	0.9174	0.8848	0.4771	0.2336	0.1596
BP × Anhydrite	<b>0.0443</b>	0.1309	0.2436	0.7926	1
BP × Combinaison d'espèces	0.8932	0.7113	0.6397	0.7777	0.1596
Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.0952	0.1676	0.1403	<b>0.0489</b>	1
BP × Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.7347	0.9839	0.1366	<b>0.0053</b>	1
<i>HSD Tukey</i>					
Combinaison d'espèces	-	-	-	-	-
PR vs PR-MEL	-	-	-	-	-
PR vs PR-PIB	-	-	-	-	-
PR-MEL vs PR-PIB	-	-	-	-	-
<b>2023 : fin de saison de croissance</b>					
Variable log transformée	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
BP	0.374	0.2545	0.9945	0.6523	0.7085
Anhydrite	<b>0.0238</b>	<b>0.0098</b>	0.3376	0.6966	0.7085
Combinaison d'espèces	0.7771	0.9996	0.6537	0.6519	<b>0.0201</b>
BP × Anhydrite	0.2582	0.8055	0.4528	0.1264	1
BP × Combinaison d'espèces	0.3474	0.6752	0.8298	0.8476	0.5716
Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.3424	0.284	0.3334	0.2434	0.5716
BP × Anhydrite × Combinaison d'espèces	0.7891	0.7703	0.7857	0.909	0.6562
<i>HSD Tukey</i>					
Combinaison d'espèces	-	-	-	-	-
PR vs PR-MEL	-	-	-	-	0.8894
PR vs PR-PIB	-	-	-	-	0.0684
PR-MEL vs PR-PIB	-	-	-	-	<b>0.0241</b>

<sup>a</sup>La croissance apicale se détermine par défaut à la 2<sup>e</sup> saison de croissance suivant la saison d'application des traitements.

<sup>b</sup>Le taux de survie se détermine en fin de saison et se compare au moment avant l'application des traitements.



**Tableau 4.** Moyennes ( $\pm$  erreur standard; n = 4) d'indices de productivité du mélèze laricin (MEL) et du pin blanc (PIB) avant et après l'application des traitements sur des haies brise-vent de la BER de l'UQAC. Les traitements : applications de biosolides de papetières (sans – T, application de 224 kg N ha<sup>-1</sup> – BP) et d'anhydrite (sans – T, application de 5 000 kg ha<sup>-1</sup> – A). Le MEL et PIB sont en combinaison avec le pin rouge sur toutes les parcelles.

Espèce	Moment de l'année	Application de BP	Application d'anhydrite	Indices de productivité					
				Surface terrière cm <sup>2</sup>	Hauteur totale cm	Croissance apicale <sup>a</sup> cm	Augmentation de la croissance <sup>a</sup> %	Taux de survie <sup>b</sup> %	
MEL	Juillet 2021 : avant l'application	T	T	0.14 (0.01)	24.9 (1.1)				
			BP	A	0.13 (0.02)	22.3 (1)			
				T	0.1 (0.01)	24.8 (1.1)			
	2021 : fin de saison de croissance	T	A	0.16 (0.02)	24 (0.9)				
			BP	T	0.17 (0.01)	24.7 (1)			100 (0)
				A	0.18 (0.02)	23.6 (0.6)			100 (0)
	2022 : fin de saison de croissance	T	A	0.22 (0.03)	25.6 (1.1)			100 (0)	
			BP	T	0.23 (0.01)	24.6 (1.1)			94 (6)
				A	0.35 (0.05)	37.5 (2.4)	12.8 (1.9)	51.2 (7.8)	100 (0)
	2023 : fin de saison de croissance	T	A	0.45 (0.06)	40.6 (3.8)	16.9 (3.6)	71.2 (15.5)	100 (0)	
			BP	T	0.51 (0.05)	49.9 (2.3)	24.3 (2.5)	100.3 (11.9)	100 (0)
				A	0.51 (0.07)	48.5 (3.4)	23.9 (3.2)	99.1 (13.7)	94 (6)
2023 : fin de saison de croissance	T	A	0.97 (0.14)	58.1 (6.1)	20.8 (4.9)	55.5 (12.6)	88 (7)		
		BP	T	1.5 (0.26)	69.8 (6.8)	27.2 (3.8)	68 (8.5)	81 (6)	
			A	1.19 (0.18)	69.8 (6.2)	26.1 (4.7)	56.2 (10.4)	81 (6)	
PIB	Juillet 2021 : avant épandage	T	T	0.07 (0.01)	4.8 (0.4)				
			BP	A	0.07 (0.01)	5.5 (0.3)			
				T	0.08 (0.01)	6.3 (0.4)			
	2021 : fin de saison de croissance	T	A	0.06 (0.01)	4.8 (0.3)				
			BP	T	0.12 (0.01)	5.3 (0.5)			94 (6)
				A	0.13 (0.01)	5.3 (0.4)			100 (0)
	2022 : fin de saison de croissance	T	A	0.15 (0.01)	6.5 (0.4)			100 (0)	
			BP	T	0.14 (0.01)	5.8 (0.3)			100 (0)
				A	0.09 (0.01)	10.4 (1)	6.1 (0.9)	137.6 (25.7)	94 (6)
	2023 : fin de saison de croissance	T	A	0.1 (0.02)	9.2 (0.7)	4.3 (0.5)	88.2 (13)	100 (0)	
			BP	T	0.14 (0.02)	12 (0.9)	5.5 (1.1)	98.9 (22.5)	100 (0)
				A	0.12 (0.02)	11.3 (0.9)	6.1 (0.9)	110.3 (16.9)	100 (0)
2023 : fin de saison de croissance	T	A	0.29 (0.04)	20 (2.2)	10.5 (1.6)	107.4 (17.5)	94 (6)		
		A	0.28 (0.04)	16.9 (1.8)	7.3 (1.4)	73.5 (12)	94 (6)		

Espèce	Moment de l'année	Application de BP	Application d'anhydrite	Indices de productivité				
				Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
				cm <sup>2</sup>	cm	cm	%	%
		BP	T	0.55 (0.11)	24.5 (1.6)	12.5 (1.2)	114.2 (14.9)	100 (0)
			A	0.37 (0.05)	20 (2.2)	8.6 (1.5)	76.2 (11.5)	100 (0)

<sup>a</sup>La croissance apicale se détermine par défaut à la 2<sup>e</sup> saison de croissance suivant la saison d'application des traitements.

<sup>b</sup>Le taux de survie se détermine en fin de saison et se compare au moment avant l'application des traitements.

**Tableau 5.** Valeurs de P des ANOVA testant les effets sur le mélèze laricin (MEL) et le pin blanc (PIB) avant et après l'application des traitements des haies brise-vent de la BER de l'UQAC. Les traitements : applications de biosolides de papetières (sans – T, application de 224 kg N ha<sup>-1</sup> – BP) et d'anhydrite (sans – T, application de 5 000 kg ha<sup>-1</sup> – A). Le MEL et PIB sont en combinaison avec le pin rouge sur toutes les parcelles.

Espèce	Source	Indices de productivité – Valeurs de P				
		Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
MEL	<b>Juillet 2021 : avant l'application</b>					
	Variable log transformée	Non	Non	-	-	-
	BP	0.7315	0.5481	-	-	-
	Anhydrite	0.1796	0.1957	-	-	-
	BP × Anhydrite	0.1413	0.4875	-	-	-
	<b>2021 : fin de saison de croissance</b>					
	Variable log transformée	Oui	Non	-	-	Non
	BP	<b>0.0164</b>	0.3333	-	-	0.3434
	Anhydrite	0.3825	0.2474	-	-	0.3434
	BP × Anhydrite	0.7344	0.9982	-	-	0.3434
	<b>2022 : fin de saison de croissance</b>					
	Variable log transformée	Non	Non	Non	Non	Non
	BP	0.1632	<b>0.0135</b>	<b>0.0251</b>	<b>0.0382</b>	0.3434
	Anhydrite	0.4721	0.8022	0.6036	0.5825	0.3434
	BP × Anhydrite	0.5417	0.5274	0.5176	0.5012	0.3434
	<b>2023 : fin de saison de croissance</b>					
Variable log transformée	Non	Non	Oui	Non	Non	
BP	0.9625	0.2742	0.7048	0.3082	0.6506	
Anhydrite	0.1979	0.2318	0.268	0.7529	0.6506	
BP × Anhydrite	0.3479	0.599	0.4554	0.3052	0.6506	
PIB	<b>Juillet 2021 : avant l'application</b>					
	Variable log transformée	Oui	Non	-	-	-
	BP	0.6789	0.2925	-	-	-
	Anhydrite	0.6874	0.219	-	-	-
	BP × Anhydrite	0.3781	<b>0.0061</b>	-	-	-

Espèce	Source	Indices de productivité – Valeurs de P				
		Surface terrière	Hauteur totale	Croissance apicale <sup>a</sup>	Augmentation de la croissance <sup>a</sup>	Taux de survie <sup>b</sup>
<b>2021 : fin de saison de croissance</b>						
	Variable log transformée	Oui	Non	-	-	Non
	BP	0.3602	0.0849	-	-	0.3434
	Anhydrite	0.8085	0.4409	-	-	0.3434
	BP × Anhydrite	0.6349	0.3887	-	-	0.3434
<b>2022 : fin de saison de croissance</b>						
	Variable log transformée	Oui	Non	Oui	Oui	Non
	BP	<b>0.0455</b>	0.2531	0.8565	0.5076	0.3434
	Anhydrite	0.4995	0.5765	0.8828	0.9227	0.3434
	BP × Anhydrite	0.2963	0.8685	0.2999	0.1155	0.3434
<b>2023 : fin de saison de croissance</b>						
	Variable log transformée	Oui	Non	Non	Non	Non
	BP	0.1415	0.2543	0.3784	0.6903	0.1173
	Anhydrite	0.3621	0.2833	0.0791	<b>0.0076</b>	1
	BP × Anhydrite	0.5011	0.8165	0.8533	0.7896	1

<sup>a</sup>La croissance apicale se détermine par défaut à la 2<sup>e</sup> saison de croissance suivant la saison d'application des traitements.

<sup>b</sup>Le taux de survie se détermine en fin de saison et se compare au moment avant l'application des traitements.

Pour le PR, l'application d'anhydrite a diminué la croissance apicale de 14% en fin de saison 2022 (Tableaux 2 et 3). En fin de saison 2023, l'application d'anhydrite a diminué la surface terrière et la hauteur totale du PR de 12% pour les deux variables (Tableaux 2 et 3). Une interaction entre espèces a été significative en fin de saison 2023 pour le taux de survie du PR, soit celle entre PR-MEL vs PR-PIB (Tableaux 2 et 3). Cependant, cette interaction n'a probablement pas de lien avec l'association des espèces car les arbres n'étaient pas assez grands pour se faire compétition pour la lumière et des ressources. Un autre facteur non mesuré pourrait être responsable de cette interaction.

Pour le MEL, l'application de BP a augmenté la surface terrière en fin de saison 2021 de 27%; en fin de saison 2022, l'application de BP a aussi augmenté la hauteur totale, la croissance apicale et l'augmentation de croissance apicale de 26, 62 et 63%, respectivement (Tableaux 4 et 5). Aucun effet significatif n'a été relevé pour la fin de saison 2023 (Tableaux 4 et 5). Ainsi, il semble que pour le moment, l'effet positif des BP ait été observé en fin de deuxième saison de croissance après l'application. Les taux de survie du MEL n'ont pas été affectés par les traitements (Tableaux 4 et 5).

Pour le PIB, l'application de BP a augmenté la surface terrière en fin de saison 2022 de 37% (Tableaux 4 et 5). En fin de saison 2023, l'augmentation de la croissance a été diminuée significativement de 33% par l'anhydrite (Tableaux 4 et 5). Les taux de survie du PIB n'ont pas été affectés par les traitements (Tableaux 4 et 5).

En rétrospective, les BP ont eu des effets positifs plus marqués sur le MEL et le PIB en fin de deuxième saison après leur application. L'effet négatif de l'anhydrite sur le PR et PIB demeure à investiguer.

## **5- Conclusion**

Notre travail a permis de mettre en évidence l'importante diversité spécifique (102 espèces) et la bonne santé des haies brise-vent implantées dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean entre 2006 et 2017.

Les stocks de carbone des haies échantillonnées sont globalement relativement faibles en raison de leur jeune âge (plus de la moitié contiennent moins de 15 t C/km dans leur biomasse) mais les plus vieilles et productives d'entre-elles ont des stocks de carbone importants (jusqu'à ~65 t C/km). Les stocks de carbone dans les sols sont élevés (> 100 t C/ha en moyenne dans les 30 premiers centimètres) mais contrairement à notre hypothèse de départ, les sols des haies ne contiennent pas plus de carbone que ceux des parcelles agricoles adjacentes malgré une importante accumulation de matière organique en surface. Ceci indique que les sols n'ont pas encore récupéré le carbone perdu suite à l'implantation des haies.

Les simulations réalisées avec le modèle Holos suggère que les stocks dans les sols et la biomasse des haies vont augmenter jusqu'à ~65 ans après l'implantation. Le potentiel de séquestration total du carbone des haies pourrait atteindre en moyenne environ 100 t C/ha en 75 ans, ce qui est comparable à d'autres régions en Amérique du Nord et Europe.

L'impact des haies brise-vent sur les rendements des cultures n'est pas clair. Les premiers résultats suggèrent que les rendements sont diminués dans une bande de 10 m en bordure des haies (zone de compétition) mais que ceux-ci sont augmentés légèrement autour de 20 m de distance. Les travaux de recherche se poursuivront au cours de la saison de 2024 pour confirmer et préciser ces tendances.

Enfin pour la fertilisation de haies avec des sous-produits industriels, les biosolides de papetières ont eu des effets positifs plus marqués sur le mélèze laricin et le pin blanc en fin de deuxième saison après leur application. Les effets des sous-produits industriels fertilisants sont à suivre. Ce dispositif a été installé en 2021 et le suivi a été fait jusqu'en 2023. Les arbres sont encore jeunes et un suivi de ce dispositif est prévu sur une base régulière dans les prochaines années. Ici, les avantages potentiels d'utiliser des sous-produits industriels fertilisants en haies brise-vent sont 1) qu'ils peuvent remplacer des engrais minéraux qui ont de grands impacts environnementaux avant même leur application au champ (e.g., émissions de GES, extraction de matière première, procédés industriels pour la conception, etc.), 2) qu'il serait logistiquement facile pour un producteur fertilisant son champ avec ces sous-produits de les appliquer également sur sa haie brise-vent adjacente et 3) que dans une perspective plus globale cette pratique rencontrerait des principes de base d'une économie circulaire, d'une bioéconomie et de l'implantation de synergies industrielles dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

## DIFFUSION DES RÉSULTATS

<p>Nous sommes en contact direct avec plus de 20 producteurs agricoles qui nous ont autorisé à récolter des données et des échantillons sur leurs exploitations. Nous leur communiquerons les résultats de nos recherches directement. Nous pensons pouvoir toucher un bien plus grand nombre de producteurs agricoles (autour de 80) via la diffusion des 4 fiches techniques qui sont jointes à ce rapport et les présentations de nos résultats lors d'évènements de diffusions (conférences etc.).</p>	
--	--

## APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Les résultats sur les services et bénéfices écosystémiques des haies brise-vent présentés ici sur la séquestration du carbone et les rendements sont encourageant. Ce rapport et les fiches techniques pourront contribuer à bien vulgariser ces bénéfices pour les producteurs agricoles afin qu'ils puissent maintenir et entretenir leurs haies.

Les effets de l'applications de sous-produits industriels fertilisants sur la productivité du PR, MEL et PIB ont été suivis de de 2021 à 2023. Pour le moment, les effets positifs des biosolides de papetières ont été plus marqués à la deuxième saison de croissance après l'application pour le MEL et PIB, soit en 2022; les effets sont à suivre pour la fertilisation des haies avec ces sous-produits industriels. Il est encore tôt pour se prononcer sur l'application possible pour l'industrie mais il y a un potentiel encourageant pour l'implantation de synergies industrielles entre les industries du secteur des pâtes et papiers, de l'aluminium et de l'agriculture. Le MAPAQ aura permis l'installation de ce dispositif qui continuera à être suivi dans les prochaines années. Ce temps de réaction aux traitements est normal dans la zone boréale.

## PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

### **Patrick Faubert, PhD**

Professeur agrégé

Codirecteur : Chaire en éco-conseil

Codirecteur : Carbone boréal

Département des sciences fondamentales

Université du Québec à Chicoutimi

555, boul. de l'Université

Chicoutimi (Québec) G7H 2B1

Canada

418 545-5011, poste 2537

pfaubert@uqac.ca

## REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Nous remercions le MAPAQ pour le financement de ce projet. Nous remercions les producteurs agricoles qui ont permis les prises de mesures pour ce projet. Nous remercions les partenaires Rio Tinto et Produits forestiers Résolu de leur collaboration et d'avoir fourni les sous-produits. Nous remercions l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), la Chaire

en éco-conseil, Carbone boréal et la Bleuetière d'enseignement et de recherche de l'UQAC pour leur contribution en nature à ce projet. Nous remercions les membres professionnels et étudiants de l'équipe de la Chaire en éco-conseil et de Carbone boréal pour toutes les activités de mesures, de traitements et d'analyses d'échantillons pour ce projet.

## Références

- Amichev BY, Bentham MJ, Kulshreshtha SN, et al (2016) Carbon sequestration and growth of six common tree and shrub shelterbelts in Saskatchewan, Canada. *Can J Soil Sci* 97:368–381. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0107>
- An Z, Bork EW, Duan X, et al (2022) Quantifying past, current, and future forest carbon stocks within agroforestry systems in central Alberta, Canada. *GCB Bioenergy* 14:669–680. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12934>
- Baldwin CS (1988) 10. The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agric Ecosyst Environ* 22–23:191–203. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90018-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90018-7)
- Boucher JF, Tremblay P, Lefebvre A, et al (2019) The Carbon Fraction in Biomass and Organic Matter in Boreal Open Woodlands of Eastern Canada. *Ecoscience* 26:309–314. <https://doi.org/10.1080/11956860.2019.1586119>
- Brandle JR, Hodges L, Zhou XH (2004) Windbreaks in North American Agricultural Systems. *Agrofor Syst* 61:. <https://doi.org/10.1023/B>
- Climate Action Initiative (2013) BC Farm Practices & Climate Change Adaptation series -- Shelterbelts. Victoria, Canada
- Drexler S, Don A (2023) Carbon storage in old hedgerows : The importance of below-ground biomass. *GCB Bioenergy* 1–16. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13112>
- Fradette O, Marty C, Faubert P, et al (2021) Additional carbon sequestration potential of abandoned agricultural land afforestation in the boreal zone: A modelling approach. *For Ecol Manage* 499:. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119565>
- Kort J (1988) Benefits of Windbreaks to Field and Forage Crops. *Agric Ecosyst Environ* 22/23:165–190
- Kröbel R, Moore J, Ni YZ, et al (2020) Demonstration and Testing of the Improved Shelterbelt Component in the Holos Model. *Front Environ Sci* 8:. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00149>
- Ma H, Mo L, Crowther TW, et al (2021) The global distribution and environmental drivers of aboveground versus belowground plant biomass. *Nat Ecol Evol* 5:1110–1122. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01485-1>
- Mayer M, Prescott CE, Abaker WEA, et al (2020) Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *For Ecol Manage* 466:118127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Mayrinc RC, Laroque CP, Amichev BY, Van Rees K (2019) Above- and below-ground carbon sequestration in shelterbelt trees in Canada: A review. *Forests* 10:. <https://doi.org/10.3390/f10100922>
- Newton PF, Amponsah IG (2006) Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments. *For Ecol Manage* 237:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.009>



- Osorio RJ, Barden CJ, Ciampitti IA (2019) GIS approach to estimate windbreak crop yield effects in Kansas–Nebraska. *Agrofor Syst* 93:1567–1576. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0270-2>
- Smith MM, Bentrup G, Kellerman T, et al (2021) Windbreaks in the United States: A systematic review of producer-reported benefits, challenges, management activities and drivers of adoption. *Agric Syst* 187:. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.103032>
- Viaud V, Kunnemann T (2021) Additional soil organic carbon stocks in hedgerows in crop-livestock areas of western France. *Agric Ecosyst Environ* 305:. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107174>
- Workman SW, Bannister ME, Nair PKR (2003) Agroforestry potential in the southeastern United States: Perceptions of landowners and extension professionals. *Agrofor Syst* 59:73–83. <https://doi.org/10.1023/A:1026193204801>

**ANNEXE(S)**

**Annexe 1.** Équations allométriques tirées de Lambert et al. (2005) utilisées pour estimer la masse sèche des différents compartiments de la biomasse aérienne des arbres. La somme de ces compartiments a été utilisée pour estimer la biomasse aérienne totale. La biomasse racinaire a été obtenue en utilisant le ratio biomasse racinaire : biomasse totale (BR : BT).

Nom vernaculaire	Bois	Écorce	Branches	Feuillage	Ratio BR : BT
Amélanchier du Canada	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Argousier	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Bouleau à papier	$0,0338 \times D^{2,0702} \times H^{0,6876}$	$0,0080 \times D^{1,9754} \times H^{0,6659}$	$0,0257 \times D^{3,1754} \times H^{-0,9417}$	$0,1415 \times D^{2,3074} \times H^{-1,1189}$	0,25
Bouleau jaune	$0,0259 \times D^{1,9044} \times H^{0,9715}$	$0,0069 \times D^{2,0834} \times H^{0,5371}$	$0,0305 \times D^{2,4044}$	$0,1119 \times D^{1,3973}$	0,25
Bouleau verruqueux	$0,0338 \times D^{2,0702} \times H^{0,6876}$	$0,0080 \times D^{1,9754} \times H^{0,6659}$	$0,0257 \times D^{3,1754} \times H^{-0,9417}$	$0,1415 \times D^{2,3074} \times H^{-1,1189}$	0,25
Caragancier de Sibérie	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Cèdre du Canada	$0,0295 \times D^{1,7026} \times H^{0,9428}$	$0,0076 \times D^{1,7861} \times H^{0,6132}$	$0,0501 \times D^{2,5165} \times H^{-0,8774}$	$0,0813 \times D^{2,2180} \times H^{-0,7907}$	0,18
Cerisier acide	$0,0181 \times D^{1,7013} \times H^{1,3057}$	$0,0101 \times D^{1,5956} \times H^{0,9190}$	$0,0005 \times D^{2,8004} \times H^{0,8603}$	$0,1976 \times D^{1,4421} \times H^{-0,5264}$	0,25
Cerisier de Sainte-Lucie	$0,0181 \times D^{1,7013} \times H^{1,3057}$	$0,0101 \times D^{1,5956} \times H^{0,9190}$	$0,0005 \times D^{2,8004} \times H^{0,8603}$	$0,1976 \times D^{1,4421} \times H^{-0,5264}$	0,25
Cerisier de Virginie	$0,0181 \times D^{1,7013} \times H^{1,3057}$	$0,0101 \times D^{1,5956} \times H^{0,9190}$	$0,0005 \times D^{2,8004} \times H^{0,8603}$	$0,1976 \times D^{1,4421} \times H^{-0,5264}$	0,25
Chalef argenté	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Chêne à gros fruits	$0,0285 \times D^{1,8501} \times H^{1,0204}$	$0,0326 \times D^{1,8100} \times H^{0,4153}$	$0,0013 \times D^{3,0637} \times H^{0,3153}$	$0,0373 \times D^{1,6740}$	0,25
Chêne bicolor	$0,0285 \times D^{1,8501} \times H^{1,0204}$	$0,0326 \times D^{1,8100} \times H^{0,4153}$	$0,0013 \times D^{3,0637} \times H^{0,3153}$	$0,0373 \times D^{1,6740}$	0,25
Chêne rouge	$0,0285 \times D^{1,8501} \times H^{1,0204}$	$0,0326 \times D^{1,8100} \times H^{0,4153}$	$0,0013 \times D^{3,0637} \times H^{0,3153}$	$0,0373 \times D^{1,6740}$	0,25
Cornouiller soyeux	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Épinette blanche	$0,0265 \times D^{1,7952} \times H^{0,9733}$	$0,0124 \times D^{1,6962} \times H^{0,6489}$	$0,0325 \times D^{2,8573} \times H^{-0,9127}$	$0,2020 \times D^{2,3802} \times H^{-1,1103}$	0,18
Épinette de Norvège	$0,0265 \times D^{1,7952} \times H^{0,9733}$	$0,0124 \times D^{1,6962} \times H^{0,6489}$	$0,0325 \times D^{2,8573} \times H^{-0,9127}$	$0,2020 \times D^{2,3802} \times H^{-1,1103}$	0,18
Épinette du Colorado	$0,0265 \times D^{1,7952} \times H^{0,9733}$	$0,0124 \times D^{1,6962} \times H^{0,6489}$	$0,0325 \times D^{2,8573} \times H^{-0,9127}$	$0,2020 \times D^{2,3802} \times H^{-1,1103}$	0,18
Épinette noire	$0,0309 \times D^{1,7527} \times H^{1,0014}$	$0,0115 \times D^{1,7405} \times H^{0,6589}$	$0,0380 \times D^{3,2558} \times H^{-1,4218}$	$0,2048 \times D^{2,5754} \times H^{-1,3704}$	0,18
Érable à sucre	$0,0301 \times D^{2,0313} \times H^{0,8171}$	$0,0103 \times D^{1,7111} \times H^{0,8509}$	$0,0661 \times D^{2,5940} \times H^{-0,4933}$	$2,5019 \times D^{2,4527} \times H^{-2,3008}$	0,25
Érable argenté	$0,0274 \times D^{1,7126} \times H^{1,1086}$	$0,0123 \times D^{1,8250} \times H^{0,5010}$	$0,0543 \times D^{3,7343} \times H^{-1,6497}$	$6,6808 \times D^{2,1092} \times H^{-2,1697}$	0,25
Érable negundo	$0,0301 \times D^{2,0313} \times H^{0,8171}$	$0,0103 \times D^{1,7111} \times H^{0,8509}$	$0,0661 \times D^{2,5940} \times H^{-0,4933}$	$2,5019 \times D^{2,4527} \times H^{-2,3008}$	0,25
Frêne blanc	$0,0224 \times D^{1,7438} \times H^{1,1899}$	$0,0126 \times D^{1,6456} \times H^{0,7893}$	$0,0461 \times D^{2,2291}$	$0,0195 \times D^{1,0509} \times H^{0,7836}$	0,25
Frêne noir	$0,0306 \times D^{2,1836} \times H^{0,5740}$	$0,0897 \times D^{2,2634} \times H^{-0,5670}$	$0,0994 \times D^{2,1630} \times H^{-0,4809}$	$0,0124 \times D^{1,0325} \times H^{0,8747}$	0,25
Frêne rouge	$0,0224 \times D^{1,7845} \times H^{1,0660}$	$0,0219 \times D^{1,4190} \times H^{0,8963}$	$0,0177 \times D^{2,3370}$	$0,1040 \times D^{1,2185}$	0,25
Groseiller	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25

Lilas commun	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Mélèze laricin	$0,0276 \times D^{1,6724} \times H^{1,1443}$	$0,0120 \times D^{1,7059} \times H^{0,5811}$	$0,0336 \times D^{3,1335} \times H^{-1,1559}$	$0,1324 \times D^{2,1140} \times H^{-0,8781}$	0,18
Merisier	$0,0181 \times D^{1,7013} \times H^{1,3057}$	$0,0101 \times D^{1,5956} \times H^{0,9190}$	$0,0005 \times D^{2,8004} \times H^{0,8603}$	$0,1976 \times D^{1,4421} \times H^{-0,5264}$	0,25
Noisetier d'Amérique	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Noyer cendré	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Noyer noir	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Orme d'Amérique	$0,0207 \times D^{2,2276} \times H^{0,6488}$	$0,0073 \times D^{2,4859}$	$0,0401 \times D^{2,1826}$	$0,0750 \times D^{1,3436}$	0,25
Orme de Sibérie	$0,0207 \times D^{2,2276} \times H^{0,6488}$	$0,0073 \times D^{2,4859}$	$0,0401 \times D^{2,1826}$	$0,0750 \times D^{1,3436}$	0,25
Peuplier baumier	$0,0117 \times D^{1,7757} \times H^{1,2555}$	$0,0180 \times D^{1,8131} \times H^{0,5144}$	$0,0112 \times D^{3,0861} \times H^{-0,7164}$	$0,0617 \times D^{1,8615} \times H^{-0,5375}$	0,25
Peuplier faux tremble	$0,0142 \times D^{1,9389} \times H^{1,0572}$	$0,0063 \times D^{2,0819} \times H^{0,6617}$	$0,0137 \times D^{2,9270} \times H^{-0,6221}$	$0,0261 \times D^{1,6304}$	0,25
Peuplier hybride	$0,0117 \times D^{1,7757} \times H^{1,2555}$	$0,0180 \times D^{1,8131} \times H^{0,5144}$	$0,0112 \times D^{3,0861} \times H^{-0,7164}$	$0,0617 \times D^{1,8615} \times H^{-0,5375}$	0,25
Physocarpe	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Pin cembro	$0,0199 \times D^{1,6883} \times H^{1,2456}$	$0,0144 \times D^{1,5994} \times H^{0,5957}$	$0,0185 \times D^{3,0584} \times H^{-0,9816}$	$0,0389 \times D^{1,729}$	0,18
Pin gris	$0,0199 \times D^{1,6883} \times H^{1,2456}$	$0,0144 \times D^{1,5994} \times H^{0,5957}$	$0,0185 \times D^{3,0584} \times H^{-0,9816}$	$0,0389 \times D^{1,729}$	0,18
Pin rouge	$0,0106 \times D^{1,7725} \times H^{0,0277}$	$0,0277 \times D^{1,5192} \times H^{0,4645}$	$0,0125 \times D^{3,3865} \times H^{-1,1939}$	$0,0731 \times D^{2,3439} \times H^{-0,7378}$	0,18
Sorbier d'Amérique	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Sureau du Canada	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Tilleul d'Amérique	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25
Viorne	$0,0359 \times D^{2,0263} \times H^{0,6987}$	$0,0094 \times D^{1,8677} \times H^{0,6985}$	$0,0433 \times D^{2,6817} \times H^{-0,5731}$	$0,0859 \times D^{1,8485} \times H^{-0,5383}$	0,25

## Annexe 2

**Tableau A2.1.** Description détaillée des parcelles du dispositif installé à la BER en juillet 2021 pour tester l'effet de sous-produits industriels fertilisants sur la productivité du pin rouge, du mélèze laricin et du pin blanc en haies brise-vent. Les traitements sur les parcelles : espèces d'arbres – pin rouge seul (PR), combinaison de pin rouge et mélèze laricin (PR-MEL), combinaison de pin rouge et pin blanc (PR-PIB); application de biosolides de papetières (BP; 0 kg N ha<sup>-1</sup> – T et 224 kg N ha<sup>-1</sup> – BP); application d'anhydrite (A; 0 kg A ha<sup>-1</sup> – T et 5 000 kg A ha<sup>-1</sup> – A).

<b>Bloc</b>	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>
<b>Haie</b>	<b>3</b>		<b>5</b>		<b>7</b>		<b>9</b>
<b>Parcelle</b>	<b>Traitement</b>	<b>Parcelle</b>	<b>Traitement</b>	<b>Parcelle</b>	<b>Traitement</b>	<b>Parcelle</b>	<b>Traitement</b>
1	T-PR-MEL	13	BP-A-PR-PIB	25	T-PR-PIB	37	T-PR
2	A-PR	14	BP-PR-MEL	26	A-PR-PIB	38	BP-A-PR-PIB
3	A-PR-MEL	15	A -PR	27	BP-A-PR	39	T-PR-PIB
4	BP-A-PR	16	BP-A-PR	28	BP-PR-PIB	40	BP-PR-PIB
5	T-PR	17	BP-PR-PIB	29	A-PR	41	BP-PR-MEL
6	BP-PR-MEL	18	T-PR-MEL	30	A-PR-MEL	42	A-PR-PIB
7	BP-PR	19	T-PR-PIB	31	BP-PR	43	BP-PR
8	BP-A-PR-MEL	20	BP-A-PR-MEL	32	T-PR-MEL	44	A-PR-MEL
9	BP-PR-PIB	21	T-PR	33	BP-A-PR-PIB	45	A-PR
10	BP-A-PR-PIB	22	A-PR-MEL	34	T-PR	46	BP-A-PR-MEL
11	A-PR-PIB	23	BP-PR	35	BP-PR-MEL	47	BP-A-PR
12	T-PR-PIB	24	A-PR-PIB	36	BP-A-PR-MEL	48	T-PR-MEL

**Annexe 3.** Listes des espèces composant les haies brise-vent implantées par le MAPAQ depuis 2006 dans la région Saguenay-Lac Saint-Jean.

nom vernaculaire	nom latin
Aulne crispé	<i>Alnus viridis</i>
Amélanchier du Canada	<i>Amelanchier canadensis</i>
Argousier faux neprum	<i>Hippophae rhamnoides</i>
Aronia noire	<i>Aronia melanocarpa</i>
Aubépine ergot de coq	<i>Crataegus crus-galli</i>
Bleuet de Corymbe	<i>Vaccinium sp</i>
Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i>
Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i>
Cassis	<i>Ribes sp</i>
Camerisier	<i>Ionicera edulis</i>
Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i>
Caryer ovale	<i>Carya ovata</i>
Caragancier de Sibérie	<i>Caragana arborescens</i>
Cerisier commun	<i>Prunus sp</i>
Cerisier à grappes	<i>Prunus sp</i>
Cerisier nain	<i>Prunus sp</i>
Cerisier de Pennsylvanie	<i>Prunus pensylvanica</i>
Cerisier des sables	<i>Prunus cistena</i>
Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i>
Cerisier de Virginie	<i>Prunus virginiana</i>
Chalef argenté	<i>Elaeagnus commutata</i>
Chêne blanc	<i>Quercus alba</i>
Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i>
Chêne rouge d'Amérique	<i>Quercus rubra</i>

nom vernaculaire	nom latin
Cornouiller stolonifère	<i>Cornus alternifolia</i>
Dierville Chèvrefeuille	<i>Diervilla lonicera</i>
Églantier	<i>Rosa canina</i>
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i>
Épinette du Colorado	<i>Picea pungens</i>
Épinette de Norvège	<i>Picea abies</i>
Épinette noire	<i>Picea mariana</i>
Érable de l'amur	<i>Acer ginnala</i>
Érable à épis	<i>Acer spicatum</i>
Érable à giguère	<i>Acer negundo</i>
Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i>
Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i>
Févier d'Amérique	<i>Gleditsia triacanthos</i>
Forsythia northern gold	<i>Forsythia sp</i>
Framboisier	<i>Rubus ideaeus</i>
Frêne blanc	<i>Fraxinus americana</i>
Frêne rouge	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>
Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i>
Fusain Ailé	<i>Euonymus alatus</i>
Hêtre à grande feuilles	<i>Fagus grandifolia</i>
Groseiller	<i>Ribes uva-crispa</i>
Lilas commun	<i>Syringa vulgaris</i>
Lilas du Japon	<i>Syringa reticulata</i>

### Annexe 3 (suite)

nom vernaculaire	nom latin
Maackie de l'Amour	<i>Maackia amurensis</i>
Maronnier de l'Ohio	<i>Aesculus glabra</i>
Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i>
Micocoulier occidental	<i>Celtis occidentalis</i>
Noyer cendré	<i>Juglans cinerea</i>
Noisetier à long bec	<i>corylus cornuta</i>
Noisetier hybride	<i>Corylus sp</i>
Noyer noir	<i>Juglans nigra</i>
Noyer hybride	<i>Juglans sp</i>
Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i>
Orme de Sibérie	<i>Ulmus pumila</i>
Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i>
Peuplier hybride	<i>Populus sp.</i>
Physocarpe à f. d'obier	<i>Physocarpus opulifolius</i>
Physocarpe nugget	<i>Physocarpus opulifolius</i>
Physocarpe	<i>Physocarpus sp</i>
Pin blanc	<i>Pinus glauca</i>
Pin blanc de Corée	<i>Pinus koraiensis</i>
Pin cembro	<i>Pinus cembra</i>
Pin gris	<i>Pinus banksiana</i>
Pin pignon	<i>Pinus pinea</i>
Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i>
Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>
Pometier décoratif	<i>Malus sp</i>

nom vernaculaire	nom latin
Potentille à feuilles golfinger	<i>Potentilla fruticosa 'Goldfinger'</i>
Poirier commun	<i>Pyrus communis</i>
Pommier commun	<i>Malus sp</i>
Prunier d'Amérique	<i>Prunus americana</i>
Prunier des sables	<i>Prunus cistena</i>
Prunier commun	<i>Prunus sp</i>
Rosier rugueux	<i>Rosa rugosa</i>
Saule arctique	<i>Salix artica</i>
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i>
Saule discolore	<i>Salix discolor</i>
Saule de l'intérieur	<i>Salix exigua</i>
Saule du Missouri	<i>Salix eriocephala</i>
Saule viminalis	<i>Salix viminalis</i>
Saule bebbiana	<i>Salix bebbiana</i>
Shepherdie argentée	<i>Shepherdia argentea</i>
Saule miabeana	<i>Salix mebeana</i>
Sorbier d'Amérique	<i>Sorbus americana</i>
Sorbier des montagnes	<i>Sorbus aucuparia</i>
Sorbier des oiseaux	<i>Sorbus aucuparia</i>
Spirée à larges feuilles	<i>Spiraea latifolia</i>
Sureau du Canada	<i>Sambucus canadensis</i>
Sureau rouge	<i>Sambucus racemosa</i>
Sumac vinaigrier	<i>Rhus glabra</i>
Symphorine blanche	<i>Symphoricarpos albus</i>

### Annexe 3 (suite)

<b>nom vernaculaire</b>	<b>nom latin</b>
Symphorine rouge	<i>Symphoricarpos sp</i>
Thuja occidental	<i>Thuja occidentalis</i>
Tilleul à petites feuilles	<i>Tilia cordata</i>
Tilleul à grandes feuilles	<i>Tilia americana</i>
Viorne cassinoïde	<i>Viburnum cassinoides</i>
Viorne lentago	<i>Viburnum lentago</i>
Viorne trilobée	<i>Viburnum trilobum</i>
Viorne	<i>Viburnum sp</i>