



**OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES ENGRAIS AZOTÉS DANS LA PRODUCTION DE PLANTES
LIGNEUSES ORNEMENTALES PRODUITES EN PLEIN CHAMP**

16-GES-13

04-2017/02-2021

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Émilie Lemaire M. Sc., agr.
Mario Comtois, B. Sc. Biol., agr.

Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale (IQDHO)

Février 2021

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.

**OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES ENGRAIS AZOTÉS DANS LA
PRODUCTION DE PLANTES LIGNEUSES ORNEMENTALES PRODUITES EN
PLEIN CHAMP
16-GES-13**

RÉSUMÉ DU PROJET

Ce projet d'une durée de trois ans avait comme objectif général d'optimiser l'utilisation des engrais azotés dans la production de plantes ligneuses ornementales en plein champ afin de maximiser le prélèvement par la plante, de réduire le taux d'application et par le fait même les émissions de gaz à effet de serre. Le projet s'est déroulé d'avril 2018 à novembre 2020 chez trois producteurs en pépinière. À chacun des sites, cinq régies de fertilisation qui varient au niveau des périodes d'application (printemps ou automne) et de la dose annuelle d'azote appliquée (100, 125 ou 150 kg/ha), ont été comparées. L'effet des traitements a été mesuré sur une espèce ligneuse différente à chaque site (Site 1 : *Syringa reticulata* 'Ivory Silk', Site 2 : *Quercus rubra* et Site 3 : *Thuja occidentalis*). Au cours de trois saisons de croissance, de nombreuses variables ont été mesurées pour déterminer la croissance et le prélèvement d'azote des arbres en fonction des traitements : hauteur et largeur d'arbres, diamètre de tronc, longueur des pousses terminales et latérales, masse sèche, et teneur en azote des feuilles, des pousses annuelles, des troncs et des racines. Très peu de différences significatives ont été observées entre les traitements. Les résultats suggèrent que l'apport annuel en azote pourrait être réduit sur certains sites sans compromettre significativement la croissance et la qualité de certaines espèces de plantes ligneuses ornementales produites en plein champ. Avec l'élimination d'une application de 50 kg N/ha, un producteur pourrait réduire annuellement les émissions de GES d'environ 807 kg éq. CO₂/ha et ses coûts de production de 48 \$/ha. La fertilisation d'automne n'a pas entraîné d'augmentation significative de la croissance, ni de la teneur en azote des arbres et ni des dommages hivernaux comparativement à la fertilisation de printemps.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Objectifs

L'objectif général du projet était d'optimiser l'utilisation des engrais azotés dans la production de plantes ligneuses ornementales en pleine terre afin de maximiser le prélèvement par la plante, de réduire le taux d'application et par le fait même les émissions de gaz à effet de serre (GES). Plus spécifiquement, le projet visait à déterminer, en conditions québécoises, l'effet d'une fertilisation minérale azotée tôt au printemps et à l'automne, sur la croissance, la qualité, le contenu en azote et la survie à l'hiver des végétaux. Ce projet avait également comme objectif d'évaluer si un meilleur prélèvement de l'azote appliqué à l'automne plutôt qu'au printemps permettrait de diminuer la dose annuelle présentement utilisée et d'estimer les émissions directes et indirectes de GES ainsi que le coût de chaque stratégie.

Dispositifs et variables mesurées

Le projet a officiellement débuté en 2017, mais à la suite de divers problèmes rencontrés au cours de cette année, il a été décidé de remettre en place les dispositifs sur de nouveaux sites. L'expérience reprise s'est déroulée en Montérégie, d'avril 2018 à novembre 2020, chez trois producteurs en pépinière. Pour les dispositifs, des plants à repiquer (liner) de lilas (*Syringa reticulata* 'Ivory Silk' - Site 1), de chênes (*Quercus rubra* - Site 2) et de thuyas (*Thuja occidentalis* - Site 3) ont été plantés en champ au printemps 2018. Les classes texturales du sol sur ces sites étaient respectivement loam sableux, sable loameux et argile sableuse.

Dans chaque dispositif en blocs complets aléatoires, cinq traitements ont été répétés quatre fois pour un total de 20 unités expérimentales (UE) composées de 12 ou 13 arbres selon le site. Les UE étaient disposées sur un ou deux rangs et séparées d'une zone tampon minimale d'un mètre. Le tableau 1 présente le calendrier de fertilisation des cinq stratégies comparées. Le traitement A représente la pratique courante des producteurs. Les traitements ont été appliqués pendant deux cycles de fertilisation s'échelonnant de septembre à juillet. Les traitements ont été appliqués et les variables mesurées sur les mêmes arbres de l'été 2018 à l'automne 2020. Toutes les applications d'engrais prévues ont été faites manuellement et ont été incorporées légèrement, autant que possible avant une pluie avec une quantité d'engrais pesée pour chaque UE afin d'assurer l'uniformité des applications et les doses de chaque application. L'engrais utilisé pour toutes les applications était du nitrate d'ammonium calcique (27-0-0). Une application d'engrais a été faite par les producteurs avant la plantation pour ajuster au besoin les autres éléments nutritifs.

Tableau 1 : Dose d'azote (kg/ha) et moment des applications d'engrais en fonction des traitements

	2018						2019						2020			
	mai	juin	juil	août	sept	oct	mai	juin	juil	août	sept	oct	mai	juin	juil	août
Trt A		50	50				50	50	50				50	50	50	
Trt B		50	50		50			50	50		50			50	50	
Trt C		50	50			50		50	50			50		50	50	
Trt D		50	50		25			50	50		25			50	50	
Trt E		50	50					50	50					50	50	

*Les carrés bleus délimitent la période des deux cycles de fertilisation

En août 2018, avant la première fertilisation d'automne, une sonde par site a été installée pour mesurer la teneur en eau et la température du sol. En avril 2019, un

pluviomètre a été installé aux sites 1 et 2. En 2020, seulement le pluviomètre au site 1 était fonctionnel.

Afin de mesurer la croissance en **hauteur** des thuyas, un marqueur a été installé sur le tronc principal dans le bas de chaque arbre. À l'aide d'un ruban à mesurer, la distance entre le marqueur et le point de croissance le plus haut a été mesurée en septembre 2018 avant la première application d'engrais d'automne et par la suite en novembre 2018 et 2019 et en septembre 2019 et 2020. La croissance pour une période donnée a été calculée par la différence entre les distances mesurées à la fin et au début de la période. Pour comparer la taille des arbres à la fin de l'essai, en septembre 2020 la plus grande largeur et la largeur perpendiculaire ont été mesurées à l'aide d'un ruban à mesurer pour calculer une **largeur moyenne** par thuya. Des observations ont été faites pour comparer la **qualité des arbres** (dommages hivernaux, couleur, taille, densité de feuillage et de cônes) en fonction des traitements.

Au début novembre 2019, avant le gel du sol, un arbre par UE a été prélevé, nettoyé et séparé en trois parties (racines, tronc et branches, feuilles). Pour comparer la **masse sèche**, le matériel a été séché et pesé, à l'exception des racines, car il n'y pas été possible de prélever tout le système racinaire. La **teneur en azote** des échantillons a été déterminée par combustion LECO au laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA. En 2020, une approche différente, moins destructive a été utilisée pour comparer la croissance et la biomasse produite pendant la saison. Des marqueurs ont été mis au bout de trois rameaux à la tête de trois arbres par UE avant le début de la croissance en mai. À la fin de l'essai en septembre, sur tous les rameaux la partie s'étant développée au-dessus des marqueurs a été prélevée, séchée, pesée et envoyée au laboratoire pour analyser la teneur en azote.

En plus, pour comparer la teneur et le prélèvement en azote des arbres, quatre échantillonnages foliaires ont été effectués entre le 22 mai et le 23 juillet 2019 et six entre le 7 mai et le 6 août 2020.

Pour les **lilas**, afin d'évaluer la **croissance en diamètre à la base** des troncs, une marque a été faite au crayon permanent à environ trois pouces du sol pour que les mesures soient toujours prises au même endroit. Vis-à-vis la marque, deux mesures perpendiculaires ont été prises à l'aide d'un pied à coulisse numérique en septembre 2018 avant la première application d'engrais d'automne et par la suite en avril, septembre et novembre 2019 et en septembre 2020. La croissance pour une période donnée a été calculée par la différence entre le diamètre moyen mesuré à la fin et au début de la période. Le gain en diamètre est la variable qui a été analysée et non le diamètre des arbres.

En 2019, l'aoûtement s'est produit au début août. Cependant, en 2020 les arbres ont souffert de la sécheresse au printemps et leur croissance s'est arrêtée au mois de juin. Après l'aoûtement en 2019 et 2020, la longueur de la **croissance annuelle** de la tige terminale et de toutes les tiges latérales a été mesurée. Des observations ont été faites pour comparer la **qualité des arbres** (dommages hivernaux, couleur, taille, densité de feuillage) en fonction des traitements.

Au début novembre 2019, avant le gel du sol, un arbre par UE a été prélevé, nettoyé et séparé en trois parties (racines, tronc et croissance des années antérieures, croissance (tiges) annuelle). Pour comparer la **masse sèche**, le matériel a été séché et pesé, à l'exception des racines, car il n'a pas été possible de prélever tout le système racinaire. Cette opération a été faite une 2^e fois après l'aoûtement en juillet

2020 sur deux arbres par UE. Des arbres avec un diamètre et une hauteur similaire avant le début des traitements de fertilisation ont été sélectionnés.

En 2019, des échantillons foliaires ont été prélevés à partir de l'observation des premières feuilles matures jusqu'à l'aoûtement à un intervalle de trois semaines. Des feuilles ont été échantillonnées à quatre reprises entre le 22 mai et le 23 juillet 2019. En 2020, l'échantillonnage a débuté avant la maturité des feuilles et a été fait à un intervalle plus rapproché au printemps. Cinq échantillonnages ont été réalisés entre le 20 mai et le 8 août 2020.

Pour les **chênes**, les mesures de **diamètre** se sont déroulées de la même façon que pour les lilas. Il en est de même pour les mesures de **croissance des tiges** à la seule différence que contrairement au lilas qui a une croissance continue, le chêne rouge a une croissance épisodique. C'est-à-dire qu'il peut avoir plusieurs poussées de croissance par année. La longueur de chaque poussée a donc été mesurée séparément.

Tout comme les thuyas et les lilas, un arbre par UE a été prélevé en novembre 2019 pour mesurer la **masse sèche** et la **teneur en azote**.

En 2019, sur les chênes, la maturité des feuilles a été atteinte plus tardivement et de façon hétérogène entre les arbres. Un échantillon composite (quatre blocs mélangés) de jeunes feuilles immatures a été prélevé pour chaque traitement le 29 mai. Ensuite, il y a eu trois échantillonnages de feuilles matures entre le 3 juin et le 23 juillet. En 2020, le débourrement a été plus hâtif et simultané entre les arbres. Cinq échantillonnages ont été réalisés entre le 26 mai et le 8 août.

Plus de 400 échantillons ont été envoyés au laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA pour déterminer la teneur en azote.

Malgré la précaution prise de sélectionner et classer les arbres et d'inspecter les sites avant la mise en place des dispositifs, un peu de variabilité provenant de la génétique des arbres et du sol a été observée après la plantation. Pour augmenter la précision et les chances de détecter des différences significatives entre les traitements, les données ont été prises sur le plus grand nombre d'arbres possible dans chaque UE. En cours de projets, des arbres ont dû être exclus à la suite de dommages ou anomalies provenant de causes biotiques ou abiotiques pouvant influencer la croissance.

Le prélèvement d'arbres avait 2 objectifs : mesurer le contenu en azote des arbres pour comparer le prélèvement en fonction des traitements et quantifier la masse sèche pour comparer la croissance entre les traitements.

Une étude plus approfondie de la littérature a mis à l'évidence que le processus de prélèvement et de translocation de l'azote diffère entre les espèces et est peu documenté pour les espèces à l'étude. Il était donc très difficile de déterminer une date au printemps où le contenu en azote des arbres représenterait la quantité prélevée et permettrait de comparer l'efficacité des applications d'automne versus celles du printemps.

Les prises de données qui exigent le prélèvement et la destruction d'arbres demandent beaucoup de temps et représentent des pertes monétaires importantes pour les producteurs. Il n'était donc pas possible de prélever beaucoup d'individus par UE. En plus de la difficulté à déterminer une date d'échantillonnage, il était difficile de faire le

choix d'individus représentatifs. Avec seulement un ou deux individus par UE, les probabilités d'obtenir des résultats précis et de détecter de vraies différences entre les traitements étaient faibles. Les résultats présentés de masse sèche et de teneur en azote dans les organes autres que les feuilles sont donc à considérer avec prudence.

Comme l'élongation des tiges s'est terminée hâtivement en 2020 pour les lilas qui montraient un peu plus de réponses aux traitements dans les analyses foliaires, cette prise de données a été tentée pour évaluer l'effet résiduel des applications aux mois de septembre, octobre et mai sur la teneur en azote dans les arbres et pour mesurer l'effet des traitements sur la biomasse produite. Par contre, cette prise de donnée a été abandonnée la 2^e année pour les chênes qui montraient une plus grande variabilité génétique entre les individus et a été faite d'une manière moins destructive et exigeante en main-d'œuvre pour les thuyas comme décrit précédemment.

Analyses statistiques

Les données de chaque site ont été analysées séparément à l'aide du logiciel R. Les données de croissance et de teneur en azote ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) selon un modèle en blocs complets aléatoires suivie d'un test de comparaison LSD protégé a posteriori de Fisher. Pour le rapport final, des analyses de covariance ont été effectuées pour les variables de croissance des lilas et des chênes. L'utilisation de cette nouvelle méthode d'analyse explique les différences de résultats entre le rapport d'étape et le rapport final.

Méthode de quantification des émissions des gaz à effet de serre (GES)

Les émissions directes et indirectes de GES associées à des stratégies de deux et trois applications d'azote par année ont été calculées selon la méthode décrite par Gasser *et al.* (2014) présentée à l'annexe 1, pour laquelle le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) du N₂O a été mis à jour (PRP = 298). Les émissions directes incluent le N₂O associé à la dénitrification des engrais minéraux azotés appliqués et le CO₂ associé à la consommation de carburant pour l'application de l'engrais. Les émissions indirectes incluent le N₂O associé à la volatilisation, le lessivage et le ruissellement des engrais minéraux azotés appliqués et le CO₂ associé à la fabrication des engrais minéraux azotés. La réduction potentielle des émissions de GES a été calculée par la réduction envisageable de la fréquence d'application et de la dose d'engrais azoté.

Analyse économique

À la suite des résultats obtenus, l'ampleur de l'analyse économique a été centrée sur le principal bénéfice potentiel observé en fonction des traitements, soit la réduction du nombre d'applications et de la quantité d'azote appliqué annuellement. Les économies possibles ont été calculées en considérant le coût de l'engrais, de l'utilisation de la machinerie et de la main-d'œuvre.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Effet sur la croissance

Au cours de toute la durée du projet, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements de fertilisation pour la **croissance des plants de thuyas**. Le moment d'application de l'engrais, ni même la dose n'ont influencé la croissance en hauteur à l'automne de septembre à novembre (2018 : $p=0,178$; 2019 : $p=0,719$). Les thuyas ont eu une croissance moyenne de 1 cm à l'automne 2018 et de 5,5 cm à l'automne 2019. Les analyses statistiques indiquent également qu'il n'y a pas eu de différence significative de croissance en hauteur entre les traitements pour le 1^{er} cycle de fertilisation (septembre 2018 à septembre 2019 $p=0,679$), le 2^e cycle (septembre 2019 à septembre 2020; $p=0,88$) et pour l'ensemble des deux années (septembre 2018 à septembre 2020; $p=0,394$). Pour ces périodes, les croissances moyennes mesurées ont été respectivement de 21,5 cm, 35,7 cm et 57,6 cm. Il est à noter que les conditions de sécheresse et de canicule ont réduit la croissance au printemps 2020. À la fin de l'essai, la largeur moyenne des thuyas n'était pas non plus significativement différente entre les traitements ($p=0,1044$). Les valeurs moyennes par traitement sont présentées dans un tableau en annexe 2. Les analyses de **masse sèche** n'ont également pas montré de différence entre les traitements pour les arbres prélevés en 2019 ($p=0,892$) et les rameaux prélevés en 2020 ($p=0,569$) (Annexe 3). Finalement, lors de la prise de données finale, aucune différence de **qualité** (couleur, taille, densité de feuillage et de cônes) n'a été observée. De plus, il n'y a pas eu davantage de dommages hivernaux dans les UE fertilisées à l'automne.

Pour les lilas, en considérant le **diamètre** à la base du tronc mesuré avant la 1^{re} application d'engrais d'automne en septembre 2018 comme covariable, les analyses n'indiquent aucune différence significative de croissance entre les traitements à l'automne 2018 ($p= 0,7117$) et 2019 ($p= 0,7783$) pendant le 1^{er} cycle de fertilisation ($p=0,2992$), le 2^e cycle ($p=0,2372$) et l'ensemble des deux années ($p=0,3062$). Pour ces périodes, les croissances moyennes en diamètre de l'ensemble des traitements ont été respectivement de 0,19 mm, 0,33 mm, 5,7 mm, 8 mm et 13,7 mm. Toutes les valeurs moyennes par traitement sont présentées dans un tableau en annexe 4.

Pour les lilas, après l'aoûtement, la longueur de **croissance annuelle de toutes les tiges** a été mesurée. Les analyses statistiques n'indiquent aucune différence significative entre les traitements pour la croissance moyenne de la tige terminale en 2019 ($p=0,5737$), 2020 ($p=0,851$) et pour la somme des deux années ($p=0,9785$). Les tiges terminales ont eu une croissance moyenne de 100,4 cm en 2019, de 35,3 cm en 2020 et de 137,6 cm pour les deux années. Rappelons qu'un stress hydrique a probablement causé un aoûtement hâtif et nu à la croissance en 2020. Il a été constaté que la somme de croissance des tiges latérales était influencée par le nombre de tiges latérales qui lui, était influencé par la hauteur des arbres au départ. Cette dernière variable a donc été utilisée comme covariable pour enlever la variabilité qui lui était associée. Les analyses effectuées sur les moyennes ajustées en fonction de la hauteur des arbres avant le 1^{er} traitement de fertilisation n'indiquent aucune différence significative entre les traitements pour la somme de croissance en longueur de toutes les tiges en 2019 ($p=0,4023$) et pour la somme des deux années ($p=0,1448$). En 2020, il y avait une tendance ($p=0,0589$). La somme de croissance était moins élevée dans les traitements D et E. Les valeurs moyennes par traitement sont présentées dans un tableau en annexe 5.

Les analyses de **masse sèche** sans et avec covariables (diamètre et hauteur) n'ont également pas montré de différence entre les traitements pour toutes les parties des arbres prélevés en 2020 ($p < 0,1$) après deux ans de différentes régies de fertilisation. Pour les arbres prélevés à l'automne 2019, la masse sèche moyenne des tiges produites pendant l'année et celle des arbres entiers (tiges et tronc) n'étaient pas significativement différentes entre les traitements ($p < 0,1$) (Annexe 6). Pour les troncs, il y a une tendance ($p = 0,065$), mais les différences semblent influencées par des effets autres que celui des traitements.

Finalement, lors de la prise de données finale, aucune différence de **qualité** (couleur, taille, densité de feuillage) n'a été observée. De plus, il n'a pas eu davantage de dommages hivernaux dans les UE fertilisées à l'automne.

Pour les **chênes**, en considérant le **diamètre** à la base du tronc mesuré avant la 1^{re} application d'engrais d'automne en septembre 2018 comme covariable, les analyses n'indiquent aucune différence significative de croissance entre les traitements à l'automne 2019 ($p = 0,3627$) pendant le 1^{er} cycle de fertilisation ($p = 0,2843$), le 2^e cycle ($p = 0,4907$) et l'ensemble des deux années ($p = 0,2938$). Pour ces périodes, les croissances moyennes en diamètre mesurées, ont été respectivement de 0,13 mm, 3,63 mm, 6,5 mm et 10,15 mm. Les données de croissance pour l'automne 2018 étaient très faibles ou négatives et n'ont pas été analysées. Les valeurs moyennes par traitement sont présentées dans un tableau en annexe 7.

Comme mentionné précédemment, les chênes peuvent avoir plusieurs poussées de croissance pendant la saison contrairement au lilas qui en a qu'une seule. Pendant la saison 2019, la majorité des chênes ont eu deux poussées de croissance. Les analyses statistiques indiquent qu'il n'y a pas d'interaction entre les traitements de fertilisation et l'allongement de la tige terminale lors des différentes périodes de croissance (1^{re} ou 2^e poussée) ($p = 0,2728$). En moyenne, la croissance a été significativement supérieure ($p < 0,0001$) lors de la 2^e poussée de croissance (41,3 cm) que lors de la 1^{re} (31,3 cm). Pour la **croissance totale de la tige terminale** (somme de toutes les poussées), les analyses indiquent des différences significatives entre les traitements de fertilisation ($p = 0,00278$). La croissance moyenne a été plus élevée dans les traitements C, D et E. Par contre, il est peu probable que ce résultat soit dû à un effet de la fertilisation et que les doses réduites d'azote aient un effet positif sur la croissance.

En 2020, au cours de la période de sécheresse, seulement 10 % des arbres ont eu deux poussées de croissance et ces arbres étaient répartis dans tout le dispositif. Les analyses statistiques n'indiquent aucune différence significative entre les traitements pour la croissance moyenne en longueur de la tige terminale en 2020 ($p = 0,151$) et pour la somme des deux années ($p = 0,177$). Les tiges terminales ont eu une croissance moyenne de 73,4 cm en 2019, de 43,4 cm en 2020 et de 117,1 cm pour les deux années.

Les analyses effectuées sur les moyennes ajustées en fonction de la hauteur des arbres avant le 1^{er} traitement de fertilisation n'indiquent aucune différence significative entre les traitements pour la somme de croissance en longueur de toutes les tiges en 2019 ($p = 0,36$), en 2020 ($p = 0,785$) et pour la somme des deux années ($p = 0,791$). Les valeurs moyennes par traitement sont présentées dans un tableau en annexe 8.

Effet sur la teneur en azote

Pour les cinq échantillonnages de tissus foliaires effectués en 2019, les analyses statistiques ne démontrent aucune différence significative entre les traitements pour la **teneur en azote** des feuilles de **thuyas** ($p < 0,1$). En 2020, de légères différences ont été observées lors du 2^e échantillonnage (20 mai) ($p = 0,0749$), alors que la teneur en azote était plus élevée pour le traitement C (1,85 %) que pour les traitements B et E (1,78 %). Tandis qu'au 4^e échantillonnage (19 juin), le feuillage avait une teneur significativement plus élevée dans les traitements D (2,31 %) et C (2,28 %) comparativement au traitement E (2,16 %) ($p = 0,0467$).

Après la 2^e fertilisation d'automne (2019), il n'y avait pas de différence significative entre les traitements pour la teneur en azote dans les racines ($p = 0,599$), les branches ($p = 0,459$) et les feuilles ($p = 0,342$). À la fin de l'essai (2020), il n'y avait toujours pas de différences pour les branches ($p = 0,917$) et les feuilles ($p = 0,305$). L'ensemble des résultats de teneur en azote dans les thuyas est présenté en annexe 9.

Pour les **lilas** en 2019, les analyses indiquent que lors du 2^e échantillonnage (12 juin), il y avait significativement plus d'azote dans les feuilles du traitement A que dans celles des quatre autres traitements ($p < 0,0001$; figure 1). Les feuilles des traitements D et E en contenaient significativement moins que celles du traitement C, mais pas du traitement B. Les traitements B et C n'étaient pas différents l'un de l'autre. Les résultats du 3^e échantillonnage (3 juillet) n'indiquent pas les mêmes différences. Étonnamment, les feuilles des traitements A et E avaient une teneur en azote similaire et significativement supérieure à celles du traitement B selon le test statistique ($p = 0,012$). La même tendance a été observée lors du 4^e échantillonnage ($p = 0,0902$).

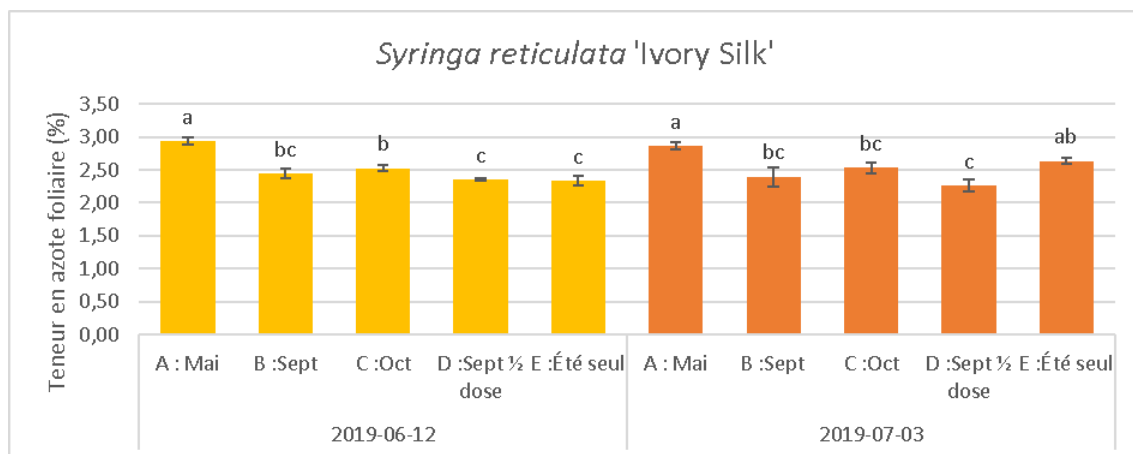


Figure 1 Teneur en azote \pm erreur type des feuilles de lilas en fonction des régies de fertilisation pour les échantillonnages 2 et 3 2019 (Les lettres différentes au sein d'un échantillonnage indiquent des différences significatives à $p < 0,05$ selon un test de LSD protégé)

En 2020, les analyses indiquent que lors du 2^e échantillonnage (5 juin), il y avait significativement plus d'azote dans les feuilles des traitements A et B que dans celles des traitements D et E ($p < 0,0184$; figure 2). Lors du 3^e échantillonnage (23 juin) les traitements A et B étaient toujours significativement différents du traitement E, mais pas du traitement B ($p = 0,015$).

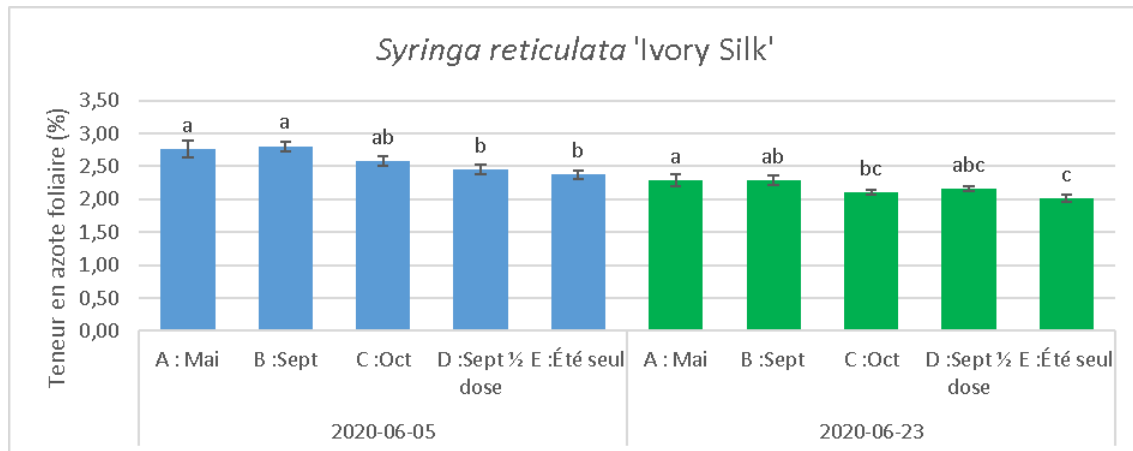


Figure 2 Teneur en azote \pm erreur type des feuilles de lilas en fonction des régies de fertilisation pour les échantillonnages 2 et 3 2020 (Les lettres différentes au sein d'un échantillonnage indiquent des différences significatives à $p < 0,05$ selon un test de LSD protégé)

Pour les arbres prélevés en novembre 2019, la teneur en azote était significativement moins élevée ($p = 0,025$) dans les racines du traitement E comparativement à ceux du traitement A et B qui n'étaient pas statistiquement différents entre eux. La même tendance a été observée pour les tiges annuelles ($p = 0,0913$). À la fin de l'essai (2020), il n'y avait pas de différence significative pour les racines ($p = 0,367$), les tiges annuelles ($p = 0,125$) et le tronc et les tiges de l'année précédente ($p = 0,525$). L'ensemble des résultats de teneur en azote dans les lilas est présenté en annexe 10.

Pour la **teneur en azote** des **chênes**, pour tous les échantillonnages de tissus (feuilles, racines, tiges, tronc) effectués en 2019 et 2020, les analyses statistiques ne montrent aucune différence significative entre les traitements ($p < 0,1$). L'ensemble des résultats des analyses de teneur en azote est présenté en annexe 11.

Teneur en eau et température du sol

La figure 3 présente l'évolution de la teneur en eau du sol (moyenne quotidienne) entre 10 et 20 cm de profondeur et la pluviométrie (somme quotidienne) mesurée au site 1 (lilas) où aucune irrigation n'a été faite lors des trois années. Le graphique montre qu'à la fin mai 2020, la teneur en eau du sol était déjà à un niveau inférieur à la valeur la plus basse enregistrée en août 2019.

Les données pour le site 2 (chêne) sont présentées en annexe 12 et pour le site 3 (thuya) en annexe 13. Sur ces deux sites, des irrigations ont été faites à partir du mois de juin 2020 ce qui a un effet sur les valeurs mesurées. Néanmoins, au site 2, en sol léger, la courbe montre bien la situation de sécheresse au mois de mai 2020, mais au site 3, en sol lourd, la différence avec 2019 est moins marquée. Les sections sans courbe sont dues à un mauvais fonctionnement de l'enregistreur au cours de ces périodes.

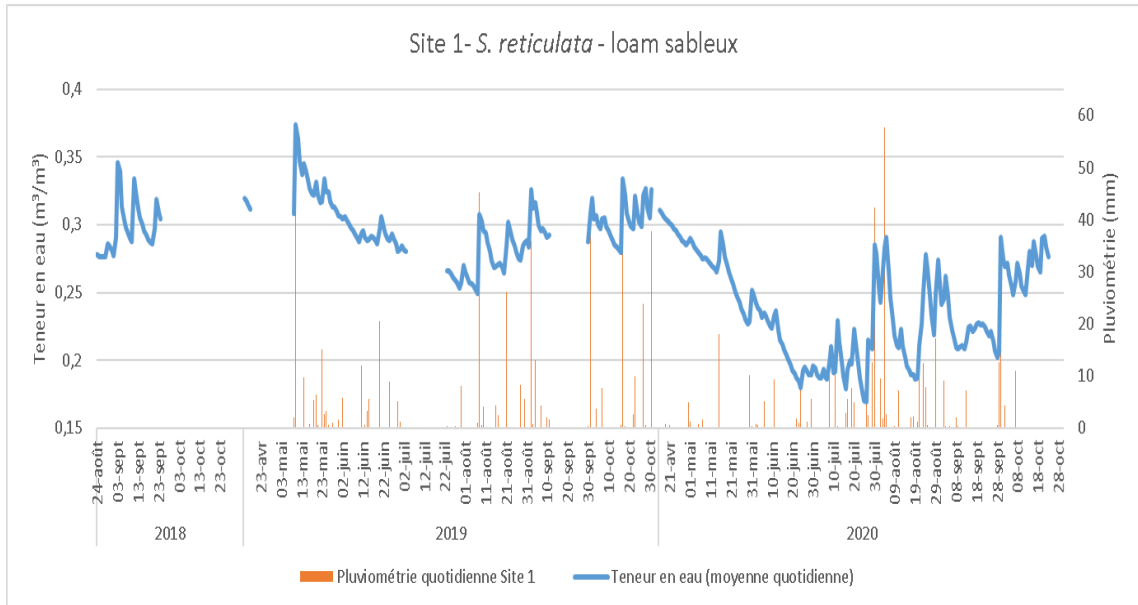


Figure 2 Teneur en eau moyenne quotidienne du sol et pluviométrie au site 1 (lilas) entre août 2018 et octobre 2020

La figure 4 présente la température quotidienne moyenne enregistrée à 15 cm de profondeur dans le sol au site 1. La représentation graphique permet de voir la tendance de la température à être plus élevée en septembre et au début du mois d'octobre qu'au début du mois de mai. Les données pour le site 2 (chêne) sont présentées en annexe 14 et pour le site 3 (thuya) en annexe 15.

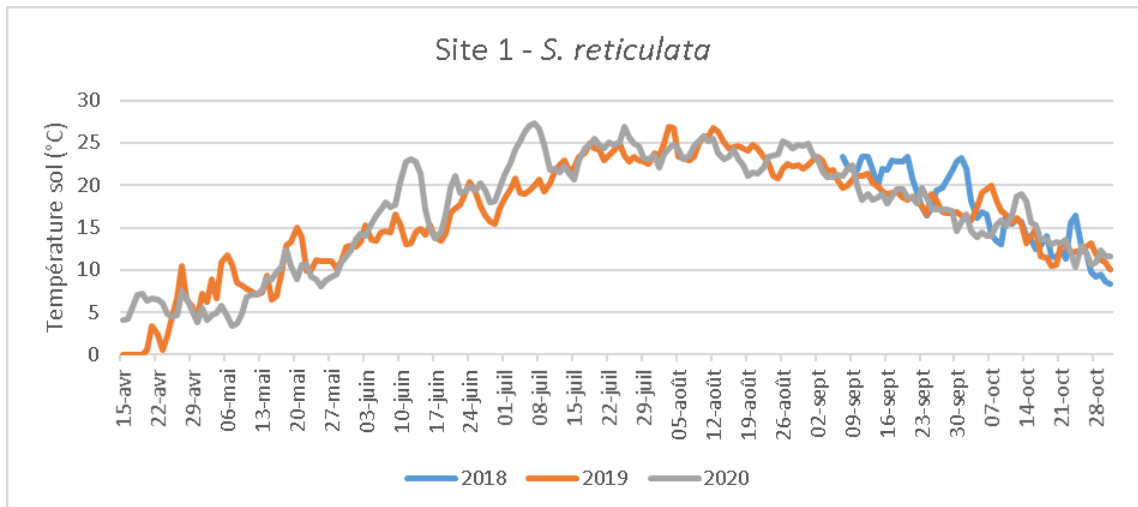


Figure 3 Température moyenne quotidienne du sol à 15 cm de profondeur au site 1 (lilas)

Réduction des émissions de GES

Il n'y a pas eu de différence de réponse des arbres que l'engrais soit appliqué au printemps, à l'automne ou à aucun de ces moments. Ce résultat montre le potentiel de réduction des apports azotés dans la production de plantes ligneuses en pleine terre. Le tableau 2 présente les émissions et réductions possibles en suivant la méthode de calcul décrite par Gasser *et al.* (2014) si la dose d'application annuelle d'azote est réduite de 25 et 50 kg.

En comparaison à la pratique actuelle de trois applications de 50 kg N par année, une réduction de 25 kg N/ha pour une des applications permettrait une baisse des émissions de GES d'environ 393 kg éq. CO₂/ha. Un passage de moins dans le champ et une réduction de 50 kg N/ha de la dose annuelle permettrait une baisse des émissions de GES d'environ 807 kg éq. CO₂/ha.

Tableau 2 Émissions de GES en fonction de trois scénarios d'application d'engrais azoté

Scénarios		Dose totale N minéral (kg/ha)	Émissions				Totales	
			Directes		Indirectes			
			N ₂ O	CO ₂	N ₂ O	CO ₂		
Traitement A, B ou C		3 x 50 kg N/ha	150	1194	59	597	572	2421
Traitement D		2 x 50 kg N/ha + 1 x 25 kg N/ha	125	995	59	498	476	2028
Traitement E		2 x 50 kg N/ha	100	796	39	398	381	1614

Gains économiques

Le coût d'achat de l'engrais a été estimé à 28 \$/ha pour une application de 50 kg N/ha. La capacité effective pour l'épandage de l'engrais est de 1 ha/h. Le coût en main-d'œuvre est donc estimé à 20 \$/h.

En éliminant une application de 50 kg N/ha, les producteurs pourraient donc faire une économie d'environ 48 \$/ha en achat d'intrant et en main-d'œuvre. Ce gain est négligeable pour les producteurs de plantes ligneuses ornementales.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les rapports et la fiche synthèse du projet seront diffusés sur le site internet Agri-Réseau et celui de l'IQDHO. Les résultats du projet auraient normalement été présentés lors du Colloque IQDHO en février 2021, mais l'évènement a été annulé en raison des contraintes sanitaires. Ils seront présentés lors de la prochaine édition. Annuellement, environ 70 participants affiliés à une trentaine d'entreprises de production en pépinière participent à l'évènement. Le 10 décembre 2020, une présentation des résultats a été faite aux conseillers de l'équipe de l'IQDHO afin d'assurer la diffusion des résultats en continu via les services-conseils techniques de l'IQDHO offerts à une centaine de producteurs en pépinière. Un résumé du projet sera publié dans le journal GTA et sur le site de l'Alliance canadienne de l'horticulture ornementale (ACHO). Un article sera soumis pour publication dans le magazine spécialisé Québec Vert.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Ce projet de fertilisation est l'un des premiers réalisés dans la production de plantes ligneuses ornementales en champ au Québec. Les résultats obtenus suggèrent que

l'apport en azote pourrait être réduit sur certains sites sans compromettre significativement le rendement et la qualité de certaines espèces de plantes ligneuses ornementales. Avec l'élimination d'une application de 50 kg N/ha, un producteur pourrait réduire les émissions de GES d'environ 807 kg éq. CO₂/ha et ses coûts de production de 48 \$/ha. Cependant, les faibles précipitations du printemps et de l'été 2020 n'ont pas permis à l'engrais de percoler jusqu'aux racines, ont grandement nui à la croissance de l'ensemble des arbres et possiblement réduit la réponse des arbres aux différents traitements de fertilisation, entre lesquels des différences plus marquées étaient attendues à la fin de la 3^e année du projet.

Par conséquent, le projet aura soulevé le doute sur l'utilité d'une dose annuelle de 150 kg N/ha et démontré le potentiel de réduction des émissions de GES en réduisant la dose, mais des résultats sur plus de sites, d'espèces et d'années seront nécessaires pour déterminer les besoins en azote des nombreuses plantes ligneuses ornementales produites en champs et convaincre l'ensemble des producteurs et des conseillers que la fertilisation azotée peut être diminuée sans réduire la croissance. Il est donc crucial de poursuivre les recherches en ce sens. D'ailleurs, un projet a été proposé en janvier dernier avec comme objectifs, d'abord, de démontrer que la pratique actuelle de fertilisation azotée dans la culture du thuya est, dans la majorité des cas, excédentaire. Ensuite, de fournir des données appuyant la dose à recommander selon les observations de production faites sur sept sites au Québec, notamment le potentiel du sol à fournir de l'azote. À ce jour, l'acceptation ou le refus de cette proposition n'a pas été confirmé.

De plus, dans un contexte de changement climatique où les précipitations pourraient être de plus en plus rares ou imprévisibles, il serait justifié d'étudier si la fertigation pourrait optimiser le prélèvement par les arbres et permettre une réduction des apports et des pertes dans l'environnement.

Néanmoins, le projet aura permis de répondre à l'une des principales préoccupations des producteurs et des conseillers concernant la fertilisation d'automne et l'augmentation des risques de dommages hivernaux. Dans ce projet, les arbres fertilisés en septembre et octobre n'ont pas subi plus de dommages ou de mortalité que ceux fertilisés selon la pratique habituelle au mois de mai. Ce résultat ouvre la porte à de plus grandes possibilités pour les périodes d'applications d'engrais. Les producteurs pourraient donc modifier leur calendrier de fertilisation et faire des applications à l'automne lorsque les conditions de sols sont plus favorables au prélèvement par les arbres.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Émilie Lemaire, M.Sc., agr.
Téléphone : 450-778-6514 poste 231
Courriel : elemaire@iqdho.com

Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale (IQDHO)
3230, rue Sicotte, E-307
Saint-Hyacinthe (Québec) J2S 2M2

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé en vertu du volet 4 du Programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de

l'Alimentation (MAPAQ) dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020).

Nous tenons à remercier sincèrement les entreprises participantes pour leurs précieuses contributions : Pépinière Auclair et frères, Pépinière Abbotsford, Pépinière Dominique Savio, Pépinière Rougemont et Pépinière Soleil.

Nous remercions également nos nombreux collègues de l'IQDHO qui ont participé à la réalisation de ce projet.

RÉFÉRENCES

CRAAQ. 2018. Références économiques. Machinerie. Coûts d'utilisation et taux à forfaits suggérés. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 25 p.

GASSER, M. A. *et al.*. 2014. Réduire les apports en azote et les émissions de GES en incorporant rapidement les lisiers en présemis des cultures annuelles. Rapport final déposé au MAPAQ en vertu du programme Prime-Vert sous volet 8.4. Agrinova, Québec : 23 pages

ENVIRONNEMENT CANADA. 2013. Rapport d'inventaire national 1990–2011 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada.

http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/ec/En81-4-2011-2-fra.pdf

GIEC. 2000. Recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Programme relatif aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpqaum_fr.html

GIEC/OCDE/AIE. 1997. Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre – version révisée 1996. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Organisation de coopération et de développement économique et Agence internationale de l'énergie.

<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/french.html>

GRAHAM *et al.*, 2008. Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. *Atmospheric Environment*, 42: 4665-4681.

McCann, T.J. 2000. Fossil fuel and derivative factors. Rapport préparé pour Environnement Canada par T.J. McCann and Associates Ltd.

Rochette, P., *et al.*, 2008. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*, 88:641-654.

ANNEXE 1 Méthodologie pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre (Adapté de Gasser *et al.*, 2014)

1. Émissions directes de N₂O associées aux applications d'engrais minéraux azotés (dénitrification) (Rochette *et al.*, 2008)

$$N_2O_{ESA} = (N_{ENG} \times CE_{BASE}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_{ESA} = émissions provenant des engrais synthétiques azotés (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale d'engrais synthétiques (kg N/an)

CE_{BASE} = coefficient d'émission : 0,017 (kg N-N₂O/ kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

2. Émissions indirectes de N₂O associées aux applications d'engrais minéraux azotés

a. Volatilisation (GIEC/OCDE/AIE, 1997)

$$N_2O_{VD} = (N_{ENG} \times FRAC_{GASF} \times CE_{VD}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_{VD} = émissions attribuables à la volatilisation et au dépôt de l'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale d'engrais synthétiques (kg N/an)

FRAC_{GASF} = fraction de l'azote d'engrais synthétiques épandus sur les sols qui se volatilise sous forme de N-NH₃ et de N-NO_x : 0,1 (kg N-NH₃ + N-NO_x/kg N)

CE_{VD} = coefficient d'émission attribuable à la volatilisation et au dépôt : 0,01 (kg N-N₂O/kg N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

b. Lessivage et ruissellement (GIEC/OCDE/AIE, 1997 et GIEC, 2000)

$$N_2O_L = (N_{ENG} \times FRAC_{LESSIVAGE} \times CE_{LESSIVAGE}) \times \frac{44}{28}$$

où : N₂O_L = émissions attribuables au lessivage et au ruissellement d'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = consommation totale (kg N/an)

FRAC_{LESSIVAGE} = fraction de l'azote perdue par lessivage et ruissellement : 0,3 (kg N/kg N) pour la zone climatique du Québec

CE_{LESSIVAGE} = coefficient d'émission attribuable au lessivage/ ruissellement : 0,025 (kg N-N₂O/kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

3. **Émissions directes de CO₂ associées aux applications d'engrais minéraux azotés**

La consommation de carburant pour l'application de l'engrais

$$\text{CO}_{2\text{CARB}} = \text{Cons}_{\text{CARB}} \times \text{CE}_{\text{CARB}}$$

où : $\text{CO}_{2\text{CARB}}$ = émissions attribuables à la consommation de carburant (kg éq CO₂/ha)

$\text{Cons}_{\text{CARB}}$ = consommation de carburant diesel (L/ha)

CE_{CARB} = coefficient d'émission attribuable à la combustion du carburant : 3,007 (kg éq CO₂/L)

Les producteurs en pépinière ornementale utilisent majoritairement des tracteurs de petite taille. Pour un tracteur de 18,5 kW (24,8 HP), la consommation a été estimée à 6,5 L/h à l'aide des références économiques du CRAAQ (CRAAQ, 2018). La capacité effective pour l'épandage de l'engrais est de 1 ha/h. La consommation de carburant est donc estimée à 6,5 L/ha.

Le coefficient d'émission tiré de Gasser *et al.* (2014) a été calculé à partir de (Environnement Canada, 2013), McCann *et al.* (2000) et Graham *et al.* (2008).

4. **Émissions indirectes de CO₂ associées à la fabrication des engrais minéraux azotés (utilisation du gaz naturel pour la fabrication de l'ammoniac)**

La fabrication d'une tonne d'ammoniac (NH₃) par le procédé Haber-Bosch nécessite en moyenne 671 m³ de gaz naturel comme matière première (Section A3.2.1 : Environnement Canada, 2013). Le gaz naturel peut également constituer une source d'énergie dans le procédé, mais cette source est exclue du calcul. Au Québec, 1 878 g de CO₂ est émis pour l'utilisation d'un m³ de gaz naturel (Tableau A8.1 : Environnement Canada, 2013) (McCann *et al.*, 2000), ce qui correspond à 4,62 kg éq. CO₂/kg NH₃ ou 3,81 kg éq. CO₂/kg N. d'engrais synthétiques (kg N/an)

$$\text{CO}_{2\text{FAB}} = \text{N}_{\text{ENG}} \times \text{CE}_{\text{FAB}}$$

où : $\text{CO}_{2\text{FAB}}$ = émissions indirectes attribuables à la fabrication de l'engrais (kg éq CO₂/an)

N_{ENG} = consommation totale (kg N/an)

CE_{FAB} = coefficient d'émission pour la fabrication : 3,81 kg éq. CO₂/kg N d'engrais synthétiques

ANNEXE 2 Croissance moyenne en hauteur et largeur moyenne à la fin de l'essai ± erreur type des thuyas (*T. occidentalis*) en fonction des régies de fertilisation

Site	Trt	Croissance en hauteur (cm)					Largeur (cm) Septembre 2020
		Automne		Cycle de fertilisation		2 ans	
		2018	2019	2018-2019	2019-2020	2018-2020	
<i>Thuja occidentalis</i>	A : Mai	1,12 ± 0,18	5,45 ± 0,29	21,47 ± 1,29	35,12 ± 3,48	64,00 ± 4,00	63,61 ± 2,67
	B : Septembre	1,13 ± 0,16	5,37 ± 0,31	22,72 ± 1,34	35,88 ± 2,69	63,50 ± 3,79	64,49 ± 2,61
	C : Octobre	0,84 ± 0,15	5,83 ± 0,33	22,12 ± 1,44	35,70 ± 2,66	60,50 ± 3,79	67,06 ± 2,54
	D : Sept ½ dose	1,12 ± 0,17	5,10 ± 0,35	20,60 ± 0,14	36,75 ± 3,68	70,50 ± 5,61	64,75 ± 2,92
	E : Été seul	0,78 ± 0,14	5,56 ± 0,38	20,79 ± 1,03	34,89 ± 2,86	67,50 ± 3,91	62,72 ± 2,66
p		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 3 Masse sèche moyenne \pm erreur type des thuyas (*T. occidentalis*) en fonction des régies de fertilisation

Site	Trt	Masse sèche moyenne par arbre (g)			
		Arbres 2019			Rameaux 2020
		Feuilles	Branches et tronc	Total	
<i>Thuja occidentalis</i>	A : Mai	113,12 \pm 12,83	60,28 \pm 5,84	173,40 \pm 18,66	12,14 \pm 0,85
	B :Septembre	104,13 \pm 18,13	60,95 \pm 7,72	165,08 \pm 25,74	11,71 \pm 0,65
	C :Octobre	101,96 \pm 9,47	59,38 \pm 4,93	161,34 \pm 14,39	12,90 \pm 0,95
	D :Sept ½ dose	117,35 \pm 14,24	66,89 \pm 9,33	184,24 \pm 23,16	14,13 \pm 1,53
	E :Été seul	96,62 \pm 11,07	57,76 \pm 4,71	154,39 \pm 15,75	12,58 \pm 1,20
p		NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 4 Croissance moyenne en diamètre ± erreur type des lilas (*S. reticulata* 'Ivory Silk') en fonction des régies de fertilisation

Site	Trt	Croissance en diamètre (mm)					
		Diamètre initial (mm)	Automne		Cycle de fertilisation		2 ans
		Septembre 2018	2018	2019	2018-2019	2019-2020	2018-2020
<i>Syringa reticulata</i> 'Ivory Silk'	A : Mai	8,53 ± 0,52	0,19 ± 0,02	0,31 ± 0,06	5,63 ± 0,50	7,70 ± 0,88	12,89 ± 1,11
	B :Septembre	8,62 ± 0,56	0,20 ± 0,05	0,38 ± 0,08	5,23 ± 0,72	6,85 ± 1,70	11,93 ± 2,39
	C :Octobre	9,28 ± 0,43	0,22 ± 0,01	0,38 ± 0,02	6,76 ± 0,54	9,17 ± 0,75	15,79 ± 1,03
	D :Sept ½ dose	8,92 ± 0,43	0,17 ± 0,02	0,31 ± 0,05	5,46 ± 0,54	7,68 ± 1,01	13,31 ± 1,70
	E :Été seul	8,48 ± 0,59	0,15 ± 0,01	0,29 ± 0,04	5,50 ± 0,66	8,74 ± 1,10	14,46 ± 1,77
p		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 5 Croissance moyenne en longueur \pm erreur type des tiges terminales et latérales des lilas (*S. reticulata* 'Ivory Silk') en fonction des régies de fertilisation

		Croissance des tiges (cm)					
		Terminale			Terminale + Latérales		
Site	Trt	2019	2020	2 ans	2019	2020	2 ans
<i>Syringa reticulata</i> 'Ivory Silk'	A : Mai	103,42 \pm 7,88	36,38 \pm 1,38	138,97 \pm 3,89	308,56 \pm 13,63	595,98 \pm 24,60	872,58 \pm 33,02
	B :Septembre	96,39 \pm 6,02	34,47 \pm 2,27	137,46 \pm 3,98	260,89 \pm 14,01	592,29 \pm 30,78	881,77 \pm 46,65
	C :Octobre	99,24 \pm 2,88	36,99 \pm 1,99	136,26 \pm 3,21	365,45 \pm 15,16	671,38 \pm 27,03	1031,25 \pm 38,87
	D :Sept ½ dose	98,18 \pm 5,49	34,37 \pm 1,45	135,08 \pm 3,80	292,45 \pm 14,23	533,60 \pm 17,41	825,01 \pm 29,59
	E :Été seul	104,58 \pm 2,46	34,16 \pm 2,04	140,07 \pm 3,48	278,66 \pm 15,17	515,13 \pm 23,63	789,15 \pm 37,91
p		NS	NS	NS	NS	0,0589	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 6 Masse sèche moyenne \pm erreur type des lilas (*S. reticulata* 'Ivory Silk') en fonction des régies de fertilisation

		Masse sèche (g)						
		2019			2020			
Site	Trt	Tiges annuelles	Tronc	Tiges + Tronc	Feuilles	Tiges annuelles	Tronc + tiges années	Feuilles + Tiges + Tronc
<i>Syringa reticulata</i> 'Ivory Silk'	A : Mai	61,73 \pm 9,37	77,46 \pm 5,01	139,18 \pm 13,15	92,60 \pm 13,18	19,75 \pm 3,14	221,74 \pm 54,86	343,82 \pm 65,08
	B : Septembre	55,68 \pm 10,00	79,22 \pm 16,98	134,90 \pm 26,49	91,27 \pm 6,39	20,78 \pm 0,49	224,07 \pm 8,38	304,44 \pm 38,47
	C : Octobre	65,17 \pm 3,19	112,46 \pm 8,38	177,63 \pm 6,05	103,77 \pm 6,97	23,96 \pm 2,14	219,22 \pm 20,29	341,66 \pm 33,05
	D : Sept ½ dose	58,50 \pm 14,43	86,16 \pm 7,92	144,66 \pm 21,81	79,98 \pm 5,19	16,23 \pm 1,21	176,64 \pm 19,86	269,94 \pm 26,89
	E : Été seul	52,17 \pm 3,88	60,87 \pm 9,70	113,04 \pm 11,45	82,85 \pm 6,29	16,83 \pm 2,13	165,81 \pm 17,32	284,52 \pm 21,36
p		NS	0,0654	NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 7 Croissance moyenne en diamètre ± erreur type des chênes (*Q. rubra*) en fonction des régies de fertilisation

Site	Trt	Croissance en diamètre (mm)				
		Diamètre initial (mm)	Automne	Cycle de fertilisation		2 ans
		Septembre 2018	2019	2018-2019	2019-2020	2018-2020
<i>Quercus rubra</i>	A : Mai	8,93 ± 0,42	0,12 ± 0,05	4,03 ± 0,23	6,99 ± 0,62	11,10 ± 0,60
	B :Septembre	8,87 ± 0,34	0,12 ± 0,05	3,36 ± 0,21	6,41 ± 0,45	9,79 ± 0,60
	C :Octobre	9,46 ± 0,72	0,13 ± 0,06	3,26 ± 0,17	6,34 ± 0,43	9,54 ± 0,54
	D :Sept ½ dose	8,99 ± 0,24	0,18 ± 0,07	3,76 ± 0,31	6,39 ± 0,44	10,11 ± 0,76
	E :Été seul	9,78 ± 0,34	0,09 ± 0,05	3,76 ± 0,49	6,42 ± 0,50	10,13 ± 0,97
p		NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 8 Croissance moyenne en longueur \pm erreur type des tiges terminales et latérales des chênes (*Q. rubra*) en fonction des régies de fertilisation

		Croissance des tiges (cm)					
		Terminale			Terminale + Latérales		
Site	Trt	2019	2020	2 ans	2019	2020	2 ans
<i>Quercus rubra</i>	A : Mai	68,64 \pm 3,07 bc	52,06 \pm 5,28	124,23 \pm 10,13	155,09 \pm 7,25	345,70 \pm 51,24	509,32 \pm 63,40
	B : Septembre	60,48 \pm 2,27 c	41,94 \pm 0,97	98,25 \pm 6,09	157,56 \pm 16,42	338,11 \pm 11,00	491,68 \pm 22,21
	C : Octobre	78,51 \pm 3,55 ab	40,67 \pm 3,19	120,32 \pm 3,83	179,71 \pm 10,02	319,35 \pm 26,70	488,33 \pm 29,49
	D : Sept ½ dose	81,91 \pm 3,12 a	39,69 \pm 3,07	120,37 \pm 6,31	167,35 \pm 15,94	321,27 \pm 20,11	508,79 \pm 32,73
	E : Été seul	77,31 \pm 2,33 ab	42,39 \pm 3,00	122,43 \pm 8,20	174,97 \pm 18,54	365,77 \pm 39,60	538,60 \pm 57,92
p		0,00278	NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

ANNEXE 9 Teneur en azote \pm erreur type des thuyas (*T. occidentalis*) en fonction des échantillonnages et des régies de fertilisation

		Teneur en azote (%)						
		Feuilles					Tiges	Racines
Site	Trt	2019-05-22	2019-06-12	2019-07-03	2019-07-23	2019-11-06	2019-11-06	2019-11-06
<i>Thuja occidentalis</i>	A : Mai	1,85 \pm 0,06	1,62 \pm 0,04	1,82 \pm 0,12	2,13 \pm 0,10	2,16 \pm 0,07	0,85 \pm 0,05	1,06 \pm 0,05
	B : Septembre	1,81 \pm 0,05	1,57 \pm 0,02	1,77 \pm 0,04	2,09 \pm 0,05	2,20 \pm 0,05	0,88 \pm 0,02	1,10 \pm 0,07
	C : Octobre	1,92 \pm 0,05	1,57 \pm 0,01	1,83 \pm 0,04	2,10 \pm 0,05	2,16 \pm 0,04	0,89 \pm 0,04	1,04 \pm 0,04
	D : Sept ½ dose	1,91 \pm 0,08	1,59 \pm 0,03	1,78 \pm 0,02	2,12 \pm 0,02	2,11 \pm 0,03	0,85 \pm 0,05	1,09 \pm 0,05
	E : Été seul	1,90 \pm 0,07	1,59 \pm 0,03	1,84 \pm 0,05	2,06 \pm 0,06	2,10 \pm 0,03	0,87 \pm 0,04	1,14 \pm 0,04
p		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

		Teneur en azote (%)							
		Feuilles							Tiges
Site	Trt	2020-05-07	2020-05-20	2020-06-05	2020-06-19	2020-07-08	2020-08-06	2020-09-24	2020-09-24
<i>Thuja occidentalis</i>	A : Mai	2,00 \pm 0,03	1,80 \pm 0,05 ab	2,20 \pm 0,02	2,23 \pm 0,07 ab	2,23 \pm 0,08	2,52 \pm 0,06	2,05 \pm 0,02	1,16 \pm 0,03
	B : Septembre	2,02 \pm 0,05	1,78 \pm 0,02 b	2,19 \pm 0,02	2,24 \pm 0,04 ab	2,21 \pm 0,08	2,55 \pm 0,06	2,03 \pm 0,04	1,16 \pm 0,05
	C : Octobre	2,02 \pm 0,04	1,85 \pm 0,02 a	2,27 \pm 0,05	2,28 \pm 0,06 a	2,25 \pm 0,10	2,56 \pm 0,04	1,97 \pm 0,03	1,11 \pm 0,09
	D : Sept ½ dose	2,02 \pm 0,04	1,82 \pm 0,03 ab	2,20 \pm 0,05	2,31 \pm 0,04 a	2,26 \pm 0,05	2,55 \pm 0,05	2,03 \pm 0,04	1,12 \pm 0,06
	E : Été seul	1,95 \pm 0,01	1,78 \pm 0,03 b	2,18 \pm 0,04	2,16 \pm 0,07 b	2,20 \pm 0,05	2,53 \pm 0,06	2,00 \pm 0,01	1,12 \pm 0,06
p		NS	0,0749	NS	0,0467	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes selon un test de LSD protégé

ANNEXE 10 Teneur en azote \pm erreur type des lilas (*S. reticulata* 'Ivory Silk') en fonction des échantillonnages et des régies de fertilisation

		Teneur en azote (%)						
		Feuilles				Racines	Tiges annuelles	Tronc
Site	Trt	2019-05-22	2019-06-12	2019-07-03	2019-07-23	2019-11-03		
<i>Syringa reticulata</i> 'Ivory Silk'	A : Mai	5,67 \pm 0,13	2,94 \pm 0,05 a	2,87 \pm 0,06 a	2,81 \pm 0,22 a	1,59 \pm 0,09 ab	1,38 \pm 0,07 a	0,88 \pm 0,06
	B :Septembre	5,48 \pm 0,20	2,45 \pm 0,08 bc	2,40 \pm 0,14 bc	2,53 \pm 0,20 ab	1,73 \pm 0,03 a	1,31 \pm 0,05 ab	0,81 \pm 0,03
	C :Octobre	5,63 \pm 0,10	2,53 \pm 0,05 b	2,53 \pm 0,08 bc	2,44 \pm 0,06 b	1,44 \pm 0,05 bc	1,22 \pm 0,04 bc	0,81 \pm 0,07
	D :Sept ½ dose	5,53 \pm 0,03	2,36 \pm 0,02 c	2,27 \pm 0,09 c	2,42 \pm 0,10 b	1,48 \pm 0,11 bc	1,28 \pm 0,07 abc	0,82 \pm 0,07
	E :Été seul	5,32 \pm 0,03	2,34 \pm 0,07 c	2,64 \pm 0,05 ab	2,79 \pm 0,21 a	1,35 \pm 0,04 c	1,15 \pm 0,07 c	0,76 \pm 0,05
p		NS	<0,0001	0,012	0,0902	0,025	0,0913	NS

		Teneur en azote (%)							
		Feuilles					Racines	Tiges annuelles	Tronc + tiges
Site	Trt	2020-05-20	2020-06-05	2020-06-23	2020-07-02	2020-08-06	2020-07-02		
<i>Syringa reticulata</i> 'Ivory Silk'	A : Mai	6,15 \pm 0,19	2,77 \pm 0,13 a	2,29 \pm 0,10 a	2,26 \pm 0,08	2,22 \pm 0,09	1,49 \pm 0,20	1,18 \pm 0,11	0,69 \pm 0,08
	B :Septembre	5,97 \pm 0,06	2,81 \pm 0,07 a	2,29 \pm 0,07 ab	2,20 \pm 0,09	2,13 \pm 0,18	1,53 \pm 0,10	1,14 \pm 0,05	0,63 \pm 0,06
	C :Octobre	5,78 \pm 0,10	2,58 \pm 0,08 ab	2,11 \pm 0,05 bc	2,11 \pm 0,07	2,09 \pm 0,13	1,28 \pm 0,07	0,99 \pm 0,06	0,64 \pm 0,06
	D :Sept ½ dose	5,83 \pm 0,07	2,46 \pm 0,07 b	2,16 \pm 0,04 abc	2,12 \pm 0,03	2,17 \pm 0,09	1,36 \pm 0,15	1,05 \pm 0,01	0,68 \pm 0,05
	E :Été seul	5,76 \pm 0,13	2,38 \pm 0,07 b	2,02 \pm 0,05 c	2,03 \pm 0,07	2,11 \pm 0,12	1,14 \pm 0,08	0,95 \pm 0,02	0,56 \pm 0,03
p		NS	0,0184	0,015	NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes selon un test de LSD protégé

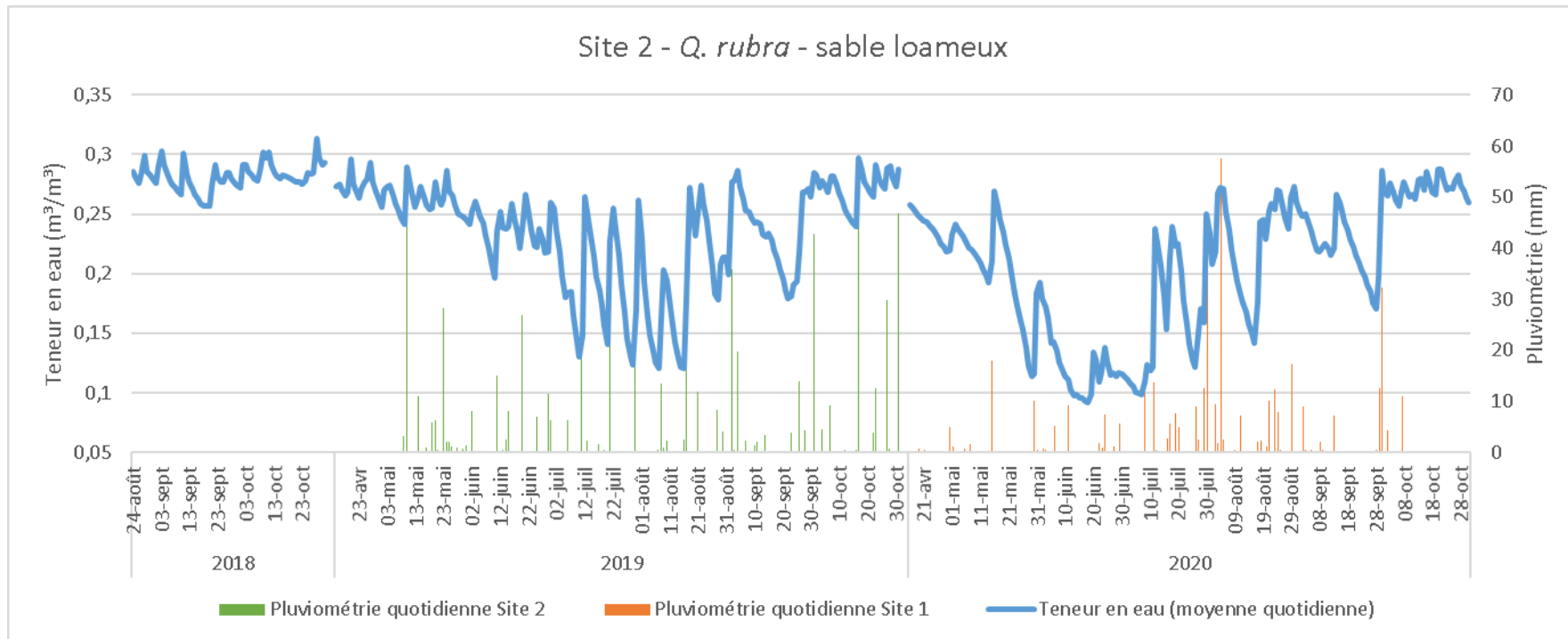
ANNEXE 11 Teneur en azote \pm erreur type des chênes (*Q. rubra*) en fonction des échantillonnages et des régies de fertilisation

		Teneur en azote (%)						
		Feuilles				Racines	Tiges annuelles	Tronc
Site	Trt	2019-06-01	2019-06-10	2019-06-26	2019-07-23	2019-11-08		
<i>Quercus rubra</i>	A : Mai	3,53	2,87 \pm 0,10	2,63 \pm 0,06	2,56 \pm 0,04	1,32 \pm 0,12	0,84 \pm 0,02	0,74 \pm 0,04
	B :Septembre	3,64	2,92 \pm 0,11	2,61 \pm 0,07	2,46 \pm 0,09	1,30 \pm 0,05	0,84 \pm 0,02	0,77 \pm 0,05
	C :Octobre	3,80	3,13 \pm 0,13	2,67 \pm 0,03	2,54 \pm 0,06	1,21 \pm 0,12	0,83 \pm 0,04	0,72 \pm 0,03
	D :Sept ½ dose	3,68	2,98 \pm 0,06	2,57 \pm 0,08	2,55 \pm 0,12	1,22 \pm 0,09	0,79 \pm 0,06	0,70 \pm 0,04
	E :Été seul	3,72	2,91 \pm 0,14	2,71 \pm 0,12	2,53 \pm 0,06	1,32 \pm 0,08	0,83 \pm 0,01	0,76 \pm 0,03
p		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

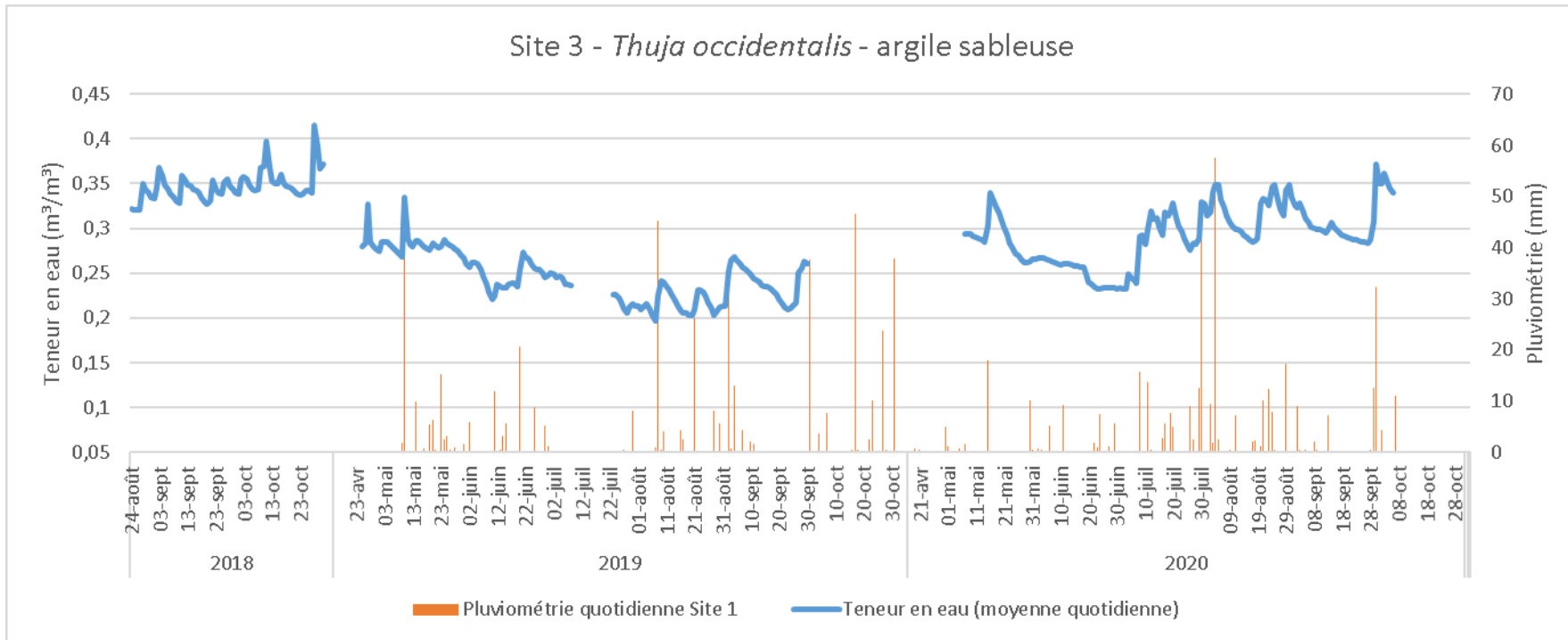
		Teneur en azote (%)				
		Feuilles				
Site	Trt	2020-05-26	2020-06-05	2020-06-19	2020-07-08	2020-08-06
<i>Quercus rubra</i>	A : Mai	4,37 \pm 0,07	3,27 \pm 0,04	2,55 \pm 0,12	2,83 \pm 0,07	3,13 \pm 0,08
	B :Septembre	4,35 \pm 0,03	3,20 \pm 0,10	2,66 \pm 0,06	2,95 \pm 0,07	3,06 \pm 0,04
	C :Octobre	4,43 \pm 0,10	3,19 \pm 0,09	2,62 \pm 0,08	2,96 \pm 0,12	3,18 \pm 0,07
	D :Sept ½ dose	4,26 \pm 0,14	3,01 \pm 0,12	2,55 \pm 0,08	2,81 \pm 0,10	2,98 \pm 0,08
	E :Été seul	4,28 \pm 0,06	3,16 \pm 0,11	2,68 \pm 0,03	3,02 \pm 0,08	3,25 \pm 0,06
p		NS	NS	NS	NS	NS

NS : différences non significatives à $p < 0,1$

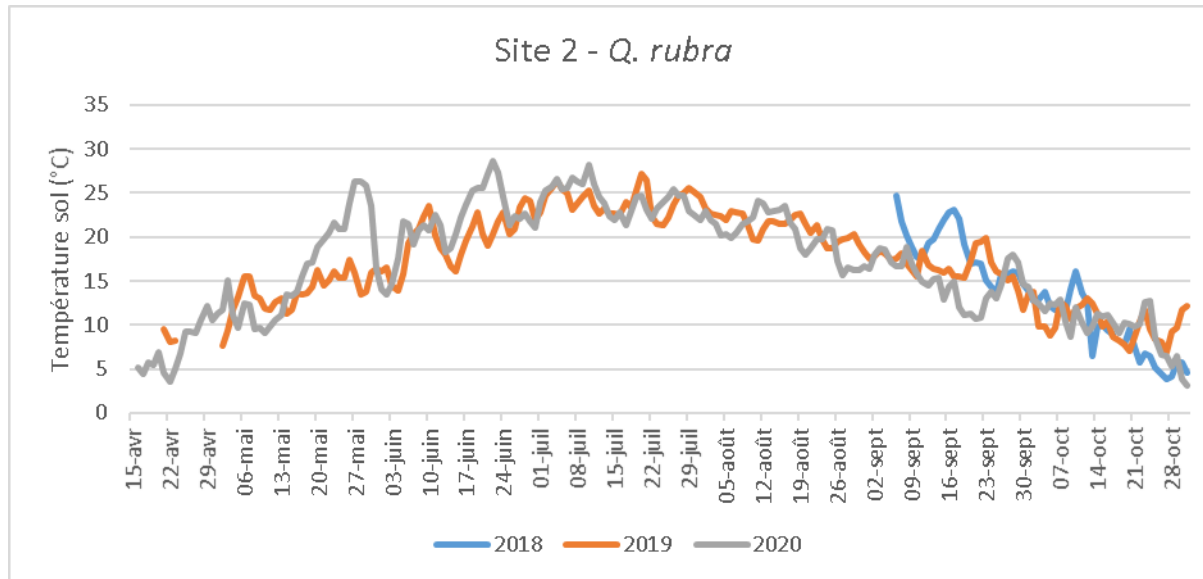
ANNEXE 12 Teneur en eau du sol mesurée au site 2 (*Q. rubra*)



ANNEXE 13 Teneur en eau du sol mesurée au site 3 (*T. occidentalis*)



ANNEXE 14 Température du sol mesurée à 15 cm de profondeur au site 2 (*Q. rubra*)



ANNEXE 15 Température du sol mesurée à 15 cm de profondeur au site 3 (*T. occidentalis*)

