

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

DYNAMIQUE SPATIALE ET TEMPORELLE DU MICROCLIMAT, DE L'EAU DU SOL ET DE LA
PRODUCTIVITÉ FOURRAGÈRE EN SYSTÈME AGROFORESTIER INTERCALAIRE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN BIOLOGIE

EXTENSIONNÉE DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

ÈVE-MARIE HÉBERT

MARS 2024

REMERCIEMENTS

Mes études ont été dirigées par David Rivest et co-dirigées par Audrey Maheu. Elles ont été réalisées grâce au soutien financier du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Avec la collaboration de mes directeurs de recherche, j'ai joué un rôle de premier plan dans la planification, l'implantation et le suivi des expériences qui ont été menées dans le cadre de mon projet de maîtrise. La plupart des sections de mon mémoire sont rédigées en anglais afin de faciliter la préparation d'un article scientifique, où je serai première auteure. Les co-auteurs de cet article seront, dans l'ordre prévu, Audrey Maheu, Marc-Olivier Martin-Guay, Marie-Noëlle Thivierge et David Rivest. Les co-auteurs de ces articles ont apporté une précieuse contribution en supervisant mes travaux, en me conseillant lors de l'analyse des données et en me fournissant certaines données (année 2021 de mon étude).

Je tiens à exprimer ma gratitude envers ces personnes ayant contribué au bon déroulement de mes études. Je suis profondément reconnaissante envers ma direction de recherche, David Rivest et Audrey Maheu pour leur expertise inestimable, leurs conseils éclairants, mais aussi pour leur clémence à travers tout le processus. La phase de collecte des données aura été au cœur de ce projet, imprégnée de paysages champêtres et de tellement d'humanité. Merci pour l'accueil sympathique de Jacques Côté sur la splendide parcelle agroforestière de Baie-du-Febvre. La collecte de données aura été grandement facilitée par la guidance de Marc-Olivier Martin-Guay, et certainement agrémentée par l'aide terrain de Samuel Juneau et de Vincent Larouche. Un grand merci à tous ces gens qui ont accepté de me recevoir chez eux pendant mes mois d'errance entre deux sites de prises de données, avec mention spéciale à ma précieuse grand-maman Lucie, à ma chère amie Ève Dupuis et à la famille Larouche. Vos maisonnées auront été des points d'ancrage chaleureux où je pouvais me déposer à travers tout ce mouvement. En-dehors du champ, je souhaite souligner l'accompagnement méticuleux de Srdjan Ostojic au laboratoire et le mentorat bienveillant de Zoé Ribeyre lors de mes débuts en rédaction.

Cet ouvrage fait l'éloge à la beauté du quotidien du paysan québécois : à la richesse de la terre et des écosystèmes sociaux qui en sont vivifiés. Rien ne peut égaler l'expérience de vivre au rythme des semences, des récoltes et de la montée en sève des érables, en compagnie de ceux qui nous sont chers.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	x
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xi
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.1.1 L’agriculture dans un climat en changement.....	1
1.1.2 Des systèmes agroforestiers intercalaires pour s’adapter aux changements climatiques	2
1.1.3 Intérêt du projet de maîtrise	3
1.2 État des connaissances	4
1.2.1 Effet des rangées d’arbres sur l’hydrologie des sols.....	4
1.2.2 Effets des rangées d’arbres sur les conditions microclimatiques.....	7
1.2.3 Effets des conditions sèches et de la disponibilité de la lumière sur la physiologie des espèces fourragères à l’étude.....	10
2. OBJECTIF ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE.....	13
3. MATERIALS AND METHODS.....	15
3.1 Study site.....	15
3.2 Experimental Design	16
3.3 Field measurements.....	18
3.3.1 Soil properties.....	18
3.3.2 Potential evaporation	18
3.3.3 Percent of total light transmittance (PTLT).....	19
3.3.4 Microclimatic conditions.....	19
3.3.5 Soil volumetric water content	20
3.3.6 Precipitation to potential evaporation ratio for each harvest.....	20
3.3.7 Forage yield.....	20
3.3.8 Forage nutritive value	21
3.4 Statistical analysis	21

4.	RESULTS	25
4.1	Soil properties	25
4.2	Potential evaporation	28
4.3	Microclimatic conditions.....	28
4.4	Soil volumetric water content.....	31
4.5	Forage yield.....	32
4.6	Forage nutritive value	35
4.7	Redundancy analysis	35
5.	DISCUSSION	37
5.1	Soil hydraulic properties were mainly enhanced beneath the tree row	37
5.2	Trees reduced potential evaporation and their influence extended to the centre of the alleyways..	38
5.3	Root pruning rather than the TBI system improved soil water availability	38
5.4	Increased yield towards the centre of alleyway during drier periods and increased forage nutritive value could compensate for the yield reduction near trees.....	39
5.5	Concluding remarks	41
6.	CONCLUSION	43
	ANNEXE A Overview of experimental site.....	45
	ANNEXE B Forage growth periods for each harvest.....	46
	ANNEXE C Piecewise structural equation models of K_{nsat} and K_{sat}	47
	ANNEXE D Group formation for potential evaporation sampling dates.....	49
	ANNEXE E Effect of root pruning at different distances from the tree row on forage nutritive value.....	50
	APPENDICE A Résolution et précisions des appareils mesurant les variables environnementales.....	51
	APPENDICE B Caractéristiques du site expérimental.....	52
	RÉFÉRENCES	53

LISTE DES FIGURES

- Figure 3.1 Block (not to scale) of the experimental design implemented in 2021 and 2022 in the tree-based intercropping system. Blocks were replicated three times, for a total of 60 subplots. Control plots were located at least 40 m away from trees. Edaphic characteristics and percentage of total light transmittance were measured at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row following subplot configuration. Yield quality and quantity were measured in all cultivated subplots, *i.e.*, all subplots except those underneath tree row (48 subplots). Meteorological stations were installed in two of three blocks, east of the tree row in the TBI system and at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row. 17
- Figure 4.1 Soil organic matter (A), soil bulk density (B), saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) (C) and near-saturated hydraulic conductivity (K_{nsat}) (D) at different distances from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Both K_{sat} and K_{nsat} are scaled logarithmically along the y-axis. Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). Box-and-whisker plots display 25th and 75th percentiles (the interquartile range [IQR] from the lower and upper edges of the box), the bold horizontal lines within boxes indicate the 50th percentiles (medians); whiskers below and above boxes indicate largest value no further than $1.5 \times$ IQR from their corresponding quartiles, beyond which dots indicate outliers. 27
- Figure 4.2 Potential evaporation measured with Piché evaporimeters at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control for conditions of high and low potential evaporation. Potential evaporation means were separated over the threshold of 12 ml h^{-1} (Figure S6.2). Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). 28
- Figure 4.3 Percent total light transmittance (PTLT) at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control in 2022. PTLT is scaled logarithmically along the y-axis. Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). 29
- Figure 4.4. Hourly average of photosynthetically active radiation (A), ambient air temperature (B), ambient relative humidity (C), and vapour-pressure deficit (D) at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control during both growing seasons of 2021 and 2022. 30
- Figure 4.5. Monthly average windspeed in 2021 (A) and 2022 (B) at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Error bars correspond to standard errors of the mean. 31
- Figure 4.6. Soil volumetric water content at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control for each sampling date. Different letters represent a significant difference among distance categories. An asterisk represents a significant difference between the pruning categories of the corresponding distance (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). 32

Figure 4.7. Dry forage production at different distances from the tree row (A) and in tree-based intercropping (TBI) system *versus* control (B). Dry forage production is scaled logarithmically along the y-axis. Within each harvest date, different letters represent a significant difference (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). P/PET values represent the conditions over the growing period that are associated with each harvest..... 34

Figure 4.8. Triplot (scaling 2) from the Redundancy Analysis illustrating the relationship between environmental conditions (blue arrows) and forage yield quantity and quality (blue arrows) in the 48 sub-plots located on cultivated land (all subplots, excluding the 0 m distance category). The percentages of variance explained along each axis correspond to their R^2 value. Only the first axis (RDA1) was significant (perm = 1000, $p < 0.01$). Production variables (Yield, Grass, Alf, Grass:Alf) are averaged across all harvests of 2022. Quality variables (NEL, CP, sol CP, ADF, NDF and NDF) are averaged over the last two harvests of 2022. SOM = soil organic matter; BD = bulk density; K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; K_{nsat} = near-saturated hydraulic conductivity (log transformation); PTLT = Proportion of total light transmittance (logit transformation); VWC = soil volumetric water content averaged over all measurements of 2022; Sand = percentage of sand; Dry matter = total forage production; Alf = total dry matter production of alfalfa; Grass = total dry matter production of forage grasses; Grass:Alf = production ratio of forage grasses to alfalfa; NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; solCP = soluble crude protein ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber. 36

Figure S6.1 Experimental layout showing the locations of each plot within the three blocks. The photo (courtesy of CRAAQ) was taken in September 2022 near 19:00..... 45

Figure S6.2 Comparison between direct effects of distance to the tree row on A) near-saturated state infiltration rate (K_{nsat}) and B) saturated hydraulic conductivity (K_{sat}); and indirect effects through soil volumetric water content (VWC) measured just before taking infiltration measurements. Piecewise structural equation models (SEM) were done using package *piecewiseSEM* in R (Lefcheck, 2016). Given that we were only interested in the comparison of direct and indirect effects of trees, the *a priori* models contained only the significant variables influencing both infiltration variables (*i.e.*, excluding root pruning; see Table 4.1). SEMs included random effects as in Eqn. 5. Non-significant links were removed (grey arrows). Global goodness-of-fit shows that we cannot reject these models. Arrow sizes represent the importance of each link based upon standardized coefficients (dashed when negative), except for distance importance, which was based upon the proportion of variance explained by distance alone (*e.g.*, the reduction in marginal R^2 when removing "VWC ~ Distance") compared to each of the other variables. Marginal R^2 -values are shown. * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$ 47

Figure S6.3. Piché evaporation at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control at each sampling date. The threshold-value of 12 mL h^{-1} (dotted line) was set to separate the sampling dates of high and low potential evaporation. Under the threshold-value, controls were more likely to have reduced evaporative demand compared to the centre of the TBI system. Above the threshold-value, controls tended to have higher evaporative demand than at the centre of TBI, while potential evaporation was consistently lower nearer to the trees and continuously increased as the middle of the cultivated alley was approached ($4 \text{ m} < 12 \text{ m} < 20 \text{ m}$). 49

Figure S6.4 Net energy for lactation (A) and undigested NDF (B) after 240 hours at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Root pruning is identified (pruned distances in red, unpruned in blue). Different letters represent a significant difference among distances categories, while an asterisk represents a significant difference between the pruning categories of the corresponding distance (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). uNDF = undigestible neutral detergent fiber..... 50

LISTE DES TABLEAUX

- Table 4.1 Mixed-effects ANOVA analysis of generalized linear mixed models for soil properties and microclimatic dependent variables. Potential evaporation and soil volumetric water content were measured at multiple times over both 2021 and 2022 growing seasons. For each model, number of observations (N), marginal (fixed effects only) and conditional (random and fixed effects) R^2 , and p -values are shown. Absence of p -value indicates that predictor variable or interaction was not included in the model. SOM = soil organic matter; BD = bulk density; K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; K_{nsat} = near-saturated hydraulic conductivity; VWC = soil volumetric water content; PTLT = proportion of total light transmittance; PE = potential evaporation; N = number of observations; D = distance from the tree row; SD = sampling date; RP = root pruning; PEi = potential evaporation intensity; \times = interaction between independent variables..... 26
- Table 4.2 Mixed-effects ANOVA of generalized linear mixed models (GLMMs) for forage yield and quality. Yield was measured over both 2021 and 2022 growing seasons. Alfalfa, grass and their ratio come from 2022 harvests only. For each model, number of observations, marginal (fixed effects only) and conditional (random and fixed effects) R^2 , and p -value are shown. NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; sol CP = soluble crude protein; ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber; N = number of observations; D = distance from the tree row; RP = root pruning; SD = sampling date; \times = interaction between independent variables. Dependent variables identified with an asterisk (*) indicate a model in which the block had to be removed from random effects to achieve model convergence..... 33
- Table 4.3 Means (\pm standard error) of dry forage alfalfa yield and grass yield at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control, in 2022. Within a column, different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). Dry forage = total dry forage yield; Alfalfa = dry alfalfa yield; Grass = dry grass yield; Grass:Alfalfa = grasses to alfalfa yield ratio..... 33
- Table 4.4 Means (\pm standard error) of forage nutritive value at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control, in 2022. Within columns, different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber. 35
- Table S6.1 Precisions on harvest growth periods for estimation of precipitation to potential evaporation ratio. For each harvest, the beginning and end dates of the forage growth period are provided. Numbers of days not estimated from the in-site meteorological stations located in the controls were estimated from a nearby weather station (Nicolet weather station, 46°13'N 72°39'W, Government of Canada, 2023) to estimate the precipitation to potential evaporation ratio..... 46

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ADF Acid detergent fiber

CP Crude protein

H Hauteur moyenne des rangées d'arbres

K_{nsat} Near-saturated hydraulic conductivity

K_{sat} Saturated hydraulic conductivity

NDF Neutral detergent fiber

P/PET Ratio precipitation to potential evaporation

PAR Photosynthetically active radiation

PTLT Percent of total light transmittance

RDA Redundancy analysis

SAI Système agroforestier intercalaire

TBI Tree-based intercropping

uNDF Undigestible neutral detergent fiber

VPD Vapour-pressure deficit

VWC Volumetric water content

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

cm Centimètre

d Day

g Gramme

ha Hectare

h Heure

kg Kilogramme

kPa Kilopascal

m Mètre

Mcal Mégacalorie

min Minute

mm Millimètre

mol Mole

nm Nanomètre

s Seconde

°C Celsius

μmol Micromole

RÉSUMÉ

La forte compétitivité du secteur agricole pousse les fermes à opter pour des pratiques d'intensification agricole productives, mais souvent vulnérables aux changements climatiques. Au Québec, la probabilité de stress hydrique des cultures est appelée à augmenter dans les prochaines décennies. Le système agroforestier intercalaire (SAI) est une avenue prometteuse à considérer pour améliorer la conservation de l'eau dans les agroécosystèmes et la stabilité des rendements face à des précipitations de plus en plus variables. Il est important de comprendre les mécanismes qui déterminent la variation spatiale et saisonnière de la disponibilité de l'eau et des rendements agricoles dans les SAI. L'objectif général du présent projet était d'évaluer la dynamique spatio-temporelle des conditions microclimatiques, des propriétés édaphiques et de la productivité d'une culture fourragère dans un SAI intégrant des peupliers et des feuillus à bois noble. Les variables ont été échantillonnées à quatre distances de la rangée d'arbres (0, 4, 12, 20 m) dans le SAI (50 arbres ha⁻¹ plantés en 2012) ainsi que dans des témoins agricoles durant deux saisons de croissance. Afin de mieux départir les interactions aériennes et souterraines entre les arbres et la culture fourragère, un traitement de cernage racinaire a été évalué. Une augmentation de la teneur en matière organique, du taux d'infiltration à saturation du sol et une diminution de la densité apparente du sol ont été mesurées dans le SAI, mais seulement sous les rangées d'arbres (0 m). Nous avons observé une augmentation de la disponibilité de l'eau du sol dans la zone près du centre de l'allée cultivée (12 et 20 m) lors des conditions très humides et très sèches, possiblement en raison d'une réduction de la vitesse du vent. La demande évaporative atmosphérique était réduite proche du centre des allées (12 et 20 m) dans des conditions de forte évaporation potentielle. À proximité de la rangée d'arbres (4 m), une réduction de l'humidité du sol, de la disponibilité de la lumière et du rendement de la culture fourragère a été mesurée. Le cernage racinaire des arbres a permis d'augmenter l'humidité du sol et le rendement à 4 m de la rangée d'arbres, sans toutefois atteindre les valeurs des témoins. Ces résultats indiquent l'influence d'autres mécanismes modulant la disponibilité de l'eau ainsi que d'une co-limitation par la lumière et l'eau sur la productivité fourragère à l'interface arbre-culture. Contrairement à la luzerne, la productivité des graminées n'a pas été influencée négativement par la concurrence des arbres. La teneur en protéines brutes de la culture fourragère à 12 m de la rangée d'arbres était supérieure à celle des témoins. Notre étude a démontré que les SAI ont le potentiel d'améliorer les propriétés hydrologiques des agroécosystèmes. Ce potentiel des SAI apparaît hautement utile face à l'augmentation prévue de la fréquence et de l'intensité des déficits hydriques et des épisodes de pluies extrêmes.

Mots clés : Système agroforestier intercalaire, cernage racinaire, microclimat, propriétés physiques du sol, disponibilité en eau du sol, cultures fourragères, rendement, valeur nutritive

ABSTRACT

The strong competitiveness of the agricultural sector pushes farms to opt for productive agricultural intensification practices that often are vulnerable to climate change. In Quebec, the frequency of crop water stress is expected to increase in the coming decades. The tree-based intercropping (TBI) system is a promising avenue to consider for improving water conservation in agroecosystems and yield stability in the face of increasingly variable precipitation patterns. It is important to understand the mechanisms that determine the spatial and seasonal variation of water availability and agricultural yields in TBI systems. The general objective of this project was to evaluate the spatiotemporal dynamics of microclimatic conditions, soil properties, and the productivity of a forage crop in a TBI integrating poplars and high-value hardwoods. Sampling was performed at four distances from the tree row (0, 4, 12, 20 m) in the TBI system (50 trees ha⁻¹ planted in 2012) as well as in agricultural controls during two growing seasons. In order to better distinguish between above and belowground interactions between trees and forage crops, a root pruning treatment was evaluated. An increase in organic matter content and saturated soil infiltration rate, and a decrease in soil bulk density were measured in the TBI, but only under the tree rows (0 m). We observed an increase in soil water availability in the area near the centre of the cultivated alley (12 and 20 m) during both extremes of water availability, possibly due to a reduction in wind speed. Atmospheric evaporative demand was reduced towards the centre of the alleys (12 and 20 m) under conditions of high potential evaporation. Near the tree row (4 m), a reduction was measured in terms of soil moisture, light availability and forage crop yield. Root encircling of trees increased soil moisture and yield at 4 m from the tree row, but not completely to the level of controls. These results indicate the influence of other mechanisms modulating soil water availability and that forage crop was co-limited by light and water availability at the tree-crop interface. Unlike alfalfa, grass productivity was not negatively influenced by tree competition. Crude protein content of the forage crop at 12 m from the tree row was higher than that of controls. Our study demonstrated that TBIs have the potential to improve the hydrological properties of agroecosystems. This potential of TBIs appears highly useful in the face of the expected increase in the frequency and intensity of water deficits and extreme rainfall events.

Keywords: Tree-based intercropping system, root pruning, microclimate, soil physical properties, soil water availability, forage crops, yield, nutritional quality

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique

1.1.1 L'agriculture dans un climat en changement

La modernisation de l'agriculture a permis d'augmenter significativement la productivité agricole au cours des dernières décennies. En revanche, l'évolution des pratiques agricoles a simplifié le paysage de plusieurs régions tempérées, par la surreprésentation d'agroécosystèmes peu diversifiés (p. ex. grandes cultures en rotations courtes). Cette homogénéisation du paysage agricole et l'intensification des pratiques ont généralement contribué à la dégradation de la santé des sols, de la qualité de l'eau, de la biodiversité et de la résilience des agroécosystèmes face aux changements climatiques (Dardonville *et al.*, 2020 ; Malézieux *et al.*, 2009 ; Yang *et al.*, 2020).

L'augmentation d'événements climatiques imprévisibles et extrêmes induits par les changements climatiques compromet la capacité de production agricole (FAO *et al.*, 2021). Il s'agit d'une tendance particulièrement alarmante puisque la production globale en 2050 devra augmenter de 35 à 52 % entre 2010 et 2050 pour subvenir aux besoins alimentaires de la population humaine grandissante (Van Dijk *et al.*, 2021). L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre a contribué au déséquilibre du cycle hydrologique global, exacerbant l'instabilité de la fréquence et de l'intensité des événements pluviaux au niveau des latitudes centrales de l'hémisphère Nord (Basche et DeLonge, 2017 ; De Wrachien et Goli, 2015). À l'échelle globale, une diminution des précipitations et/ou une augmentation de l'évaporation suggèrent que des sécheresses plus sévères et plus fréquentes seront observables dans les prochains 30 à 90 ans (Dai, 2013). La hausse de l'occurrence et de l'intensité des stress hydriques occasionnés par les sécheresses risquent d'affecter de plus en plus négativement la productivité des cultures (Lesk *et al.*, 2016). Par exemple, en 2021, les cultures canadiennes comme le blé et le canola ont subi des diminutions de rendement de 30 à 40 % par rapport à ceux de 2020 en raison d'une sécheresse prolongée (World Meteorological Organization, 2021).

Au sud du Québec, la probabilité d'occurrence de stress hydrique des cultures est appelée à augmenter avec les changements climatiques. Des hausses de 1,0 à 1,8 °C des températures moyennes estivales sont attendues pour l'horizon 2011-2040 (simulation CMIP5, scénario RCP 4.5) (Ouranos, 2015a). Également, les vagues de chaleur devraient devenir plus fréquentes au cours des prochaines décennies (Ouranos, 2015a). La hausse des températures a pour conséquence d'augmenter la demande

évaporative de l'atmosphère. L'augmentation de l'évapotranspiration qui en découle se traduirait par une diminution de la disponibilité en eau du sol. Une légère augmentation des précipitations est attendue pour le sud du Québec (simulations CMIP5 pour la période de 2081-2100 par rapport à 1981-2000) en raison notamment d'une hausse de la quantité de précipitation provenant des jours les plus pluvieux (Ouranos, 2015b). Ces précipitations abondantes seront toutefois entrecoupées de longues périodes sans pluie. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des stress hydriques est anticipée pour le sud du Québec et pour plusieurs autres régions de l'Amérique du Nord (Cook *et al.*, 2018 ; Ouranos, 2015a ; Zhao et Dai, 2015).

1.1.2 Des systèmes agroforestiers intercalaires pour s'adapter aux changements climatiques

Il est urgent de s'adapter aux changements climatiques, notamment à travers l'amélioration des pratiques agroenvironnementales existantes (Howden *et al.*, 2007). L'une des avenues les plus prometteuses pour faire progresser les efforts d'adaptation aux changements climatiques est l'agroforesterie (Hernández-Morcillo *et al.*, 2018 ; Schoeneberger *et al.*, 2012). Au Québec, on définit l'agroforesterie comme un système intégré reposant sur l'association intentionnelle d'arbres ou d'arbustes à des cultures ou à des élevages et dont l'interaction permet de générer des bénéfices économiques, environnementaux et sociaux (Anel *et al.*, 2017). L'agroforesterie intercalaire apparaît de plus en plus acceptable en milieux tempérés, où se pratique une agriculture intensive. Dans le système agroforestier intercalaire (SAI), plusieurs rangées d'arbres sont disposées dans la parcelle cultivée avec un écartement suffisant pour permettre la mécanisation des pratiques agricoles. Ce modèle d'agroforesterie, adéquatement installé, permet d'étendre les bénéfices environnementaux des arbres à l'ensemble de la parcelle plutôt que de les restreindre à leur bordure, comme c'est le cas dans les systèmes avec haies agroforestières qui sont plus connus et répandus dans les régions tempérées. Contrairement aux haies, les effets des SAI tempérés sur les conditions microclimatiques et les flux hydrologiques sont encore peu étudiés. De rares études antérieures suggèrent que les SAI ont le potentiel d'atténuer les effets négatifs du stress hydrique sur les cultures en réduisant la vitesse du vent et les fluctuations de la température du sol et de l'air (Wolz et DeLucia, 2018). La modification de ces conditions microclimatiques se traduit par une évapotranspiration moindre, notamment en ce qui concerne l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des cultures, permettant ainsi de conserver l'eau dans le sol (Jacobs *et al.*, 2022).

1.1.3 Intérêt du projet de maîtrise

Au Québec, les superficies en cultures fourragères représentent une proportion considérable (45 % en 2016) de l'ensemble de la superficie cultivée (MAPAQ, 2018). Leur présence accrue sur le territoire s'explique par leur utilisation pour la nutrition du bétail, particulièrement pour la production laitière qui représente un secteur majeur de l'industrie agricole de la province (MAPAQ, 2018). Les premiers travaux sur les SAI tempérés ont été réalisés en expérimentant des écartements relativement faibles entre les rangées d'arbres (8-15 m). Bien que ces SAI aient permis de documenter rapidement les interactions arbre-culture, ces systèmes ne s'avèrent pas optimaux du point de vue de la productivité agricole, ce qui représente un frein à leur adoption par les agriculteurs (Laroche *et al.*, 2020 ; Pardon *et al.*, 2018 ; Rois-Díaz *et al.*, 2018). Récemment, les nouveaux SAI tempérés à larges écartements entre les rangées d'arbres (35-40 m) ont été expérimentés avec succès, notamment grâce à une meilleure maîtrise de la compétition entre les arbres et les cultures (Carrier *et al.*, 2019). Afin d'améliorer la conception des SAI et leur adoption à grande échelle, il est nécessaire de mieux connaître les effets de cette configuration sur la disponibilité de l'eau, une ressource qui peut grandement affecter le rendement des cultures. Les arbres des SAI ont le potentiel d'influencer les flux hydrologiques de multiples manières, ce qui complexifie la compréhension du bilan hydrique global propre au SAI et de son impact sur les rendements. Par exemple, des effets de compétition entre les arbres et les cultures peuvent se conjuguer à des effets de facilitation microclimatique et édaphique (Nasielski *et al.*, 2015).

Les résultats des travaux antérieurs réalisés au Québec et dans des régions similaires suggèrent que les effets des SAI sur les rendements des cultures associées peuvent grandement varier selon les conditions climatiques, avec des effets positifs amplifiés lors des saisons plus sèches ou anormalement chaudes (Arenas-Corraliza *et al.*, 2018 ; Gagné *et al.*, 2022). Le présent projet étudiera les impacts d'un SAI sur un mélange d'espèces vivaces dont une légumineuse, la luzerne, et trois espèces de graminées de saison fraîche. La culture fourragère est particulièrement intéressante puisque cette production est associée à plusieurs récoltes dans une saison de croissance, ce qui permet d'étudier les effets de différentes conditions hydrométéorologiques à l'intérieur d'une saison de croissance. Aussi, certaines études ont montré que les rendements de certaines espèces fourragères augmentent sous un ombrage modéré des arbres (Lin *et al.*, 1998 ; Pang *et al.*, 2019). À ma connaissance, aucune étude n'a permis de vérifier si les effets des SAI sur le rendement des différentes récoltes fourragères sont modulés par la disponibilité de l'eau. Or, il a été suggéré que des déficits de précipitations peuvent réduire catastrophiquement les rendements fourragers au Québec (Thivierge *et al.*, 2023). Par ailleurs, l'effet du SAI sur le rendement

fouurrager peut varier selon les pratiques agroforestières des SAI (Jose *et al.*, 2004 ; Reynolds *et al.*, 2007 ; Torralba *et al.*, 2016). Ainsi, un autre aspect original de ce projet consistera à tester l'effet du cernage racinaire, une opération visant à réduire la compétition racinaire arbre-culture, sur la disponibilité en eau et le rendement des cultures. Les résultats de ce projet approfondiront les connaissances liées aux interactions hydrologiques directes et indirectes de la présence d'arbres sur la disponibilité en eau et ses effets sur la productivité des cultures.

1.2 État des connaissances

Suite à la phase d'établissement des arbres, le SAI peut se diviser en deux zones où l'effet des arbres est substantiellement différent : 1) une zone de compétition pour la lumière et l'eau à proximité des arbres et 2) une large zone de facilitation couvrant le centre de l'allée cultivée où les arbres influencent les cultures à travers une réduction de la vitesse du vent. Dans la première zone, l'ombrage des arbres serait le principal facteur limitant pour la productivité des grandes cultures dans l'est du Canada, où les précipitations sont généralement abondantes et fréquentes (Reynolds *et al.*, 2007 ; Rivest *et al.*, 2009). Lors de périodes plus sèches, la compétition souterraine pour l'eau à proximité des arbres peut aussi devenir un facteur limitant les rendements des cultures (Carrier *et al.*, 2019 ; Jose *et al.*, 2004 ; Nasielski *et al.*, 2015). Le cernage racinaire est une pratique agroforestière destinée à réduire la compétition racinaire des arbres pour l'eau par le passage d'une sous-soleuse tranchant les racines des arbres de part et d'autre de la rangée d'arbres.

Dans la deuxième zone, la diminution de la vitesse du vent contribue à y limiter les fluctuations de la température et de l'humidité de l'air et du sol. Ces conditions peuvent alors engendrer l'atténuation de l'évapotranspiration pouvant conduire à une photosynthèse accrue (Kanzler *et al.*, 2019). La productivité des cultures y serait alors augmentée par une optimisation de l'utilisation de l'eau (Pardon *et al.*, 2018). Les prochaines sections de l'état des connaissances visent à décrire les possibles effets spatio-temporels du SAI durant la saison de croissance sur différentes variables microclimatiques et hydrologiques et comment celles-ci peuvent venir influencer le rendement des cultures.

1.2.1 Effet des rangées d'arbres sur l'hydrologie des sols

La porosité détermine l'espace disponible pour le stockage et le mouvement de l'eau dans le sol en indiquant le pourcentage d'espace interstitiel vide relatif à un volume établi de sol (Hillel, 2003). Il existe

deux types de porosité : la macroporosité, où le mouvement de l'eau est principalement dicté par les forces de la gravité, et la microporosité, où l'eau adhère aux particules du sol par des forces capillaires (Lagacé, 2016). Des études réalisées dans différents systèmes agroforestiers ont révélé que les racines de la végétation pérenne, notamment des arbres, contribuent à augmenter la porosité totale du sol (Anderson *et al.*, 2009 ; Sahin *et al.*, 2016 ; Seobi *et al.*, 2005). Une autre étude a montré que diverses haies agroforestières implantées au nord de l'Angleterre ont permis d'augmenter la diversité de la taille des pores et la circulation de l'eau dans les micropores du sol sous la rangée d'arbres, potentiellement en raison de l'absence de compaction par la machinerie agricole et d'une augmentation de la densité racinaire à différentes profondeurs du sol (Holden *et al.*, 2019).

La matière organique dans le sol influence sa structure, sa capacité de rétention de l'eau ainsi que le mouvement de l'eau. Lorsqu'ils atteignent un stade de développement avancé, les arbres agroforestiers peuvent générer des quantités considérables de litières sous forme de feuilles, de racines fines et de rhizodépôts, qui contribuent à enrichir la teneur en matière organique du sol (Lorenz et Lal, 2014) et à accroître l'abondance des communautés microbiennes et fauniques du sol (Marsden *et al.*, 2020 ; Udawatta *et al.*, 2019). Dans les systèmes agroforestiers, une augmentation de la teneur en matière organique dans l'horizon superficiel (0-10 cm) du sol a été associée à une augmentation de la capacité de stockage de l'eau et à la formation d'agrégats résistants à l'eau (Basche et DeLonge, 2019 ; Udawatta *et al.*, 2008). L'augmentation de la capacité de rétention de l'eau augmente la disponibilité de l'eau pour les plantes lors des conditions climatiques plus sèches, ce qui peut améliorer la stabilité des rendements cultureux (Basche et DeLonge, 2019).

L'augmentation de la porosité et de la teneur en matière organique dans le sol près des arbres a une influence positive sur la conductivité hydraulique du sol, une variable qui caractérise la facilité avec laquelle l'eau s'infiltré et percole dans le sol (Hillel, 2003). Une caractéristique clé permettant d'augmenter le taux d'infiltration en sol agricole est la présence en continu de racines issues de végétation pérenne (Basche et DeLonge, 2019). De plus, l'augmentation de la diversité des traits racinaires générée par les arbres agroforestiers combinés à une abondance faunique accrue dans le sol peuvent favoriser la formation de canaux qui engendrent un flux préférentiel lors d'événements pluvieux (Bayala et Prieto, 2020). La conductivité hydraulique à saturation du sol près des rangées d'arbres est ainsi généralement supérieure à celle loin des rangées d'arbres ou dans les parcelles dépourvues d'arbres (Holden *et al.*, 2019 ; Seobi *et al.*, 2005 ; Wolz et DeLucia, 2019). Les relations entre le taux

d'infiltration et les rendements en SAI sont peu documentées, bien qu'il soit connu qu'une amélioration des propriétés édaphiques, par l'augmentation du contenu en matière organique du sol, serait associée à la stabilisation des rendements agricoles (Williams *et al.*, 2018).

Les différentes stratégies de croissance des espèces d'arbres peuvent aussi influencer la disponibilité de l'eau du sol et les rendements. Le contenu en eau du sol peut grandement varier en fonction de l'étendue et de la densité racinaire des arbres dans la couche superficielle du sol (Sudmeyer *et al.*, 2002). Ces deux traits racinaires varient en fonction des espèces d'arbres choisies qui composent le SAI. Par exemple, le peuplier, un genre à croissance rapide, va développer plus rapidement et plus densément son système racinaire que des espèces à croissance modérée comme que le chêne rouge (Bouttier *et al.*, 2014). De par ses besoins élevés en eau, le peuplier est aussi un compétiteur pour l'eau plus important que les feuillus à croissance modérée (Bouttier *et al.*, 2014 ; Reynolds *et al.*, 2007). Ainsi, les cultures fourragères près des peupliers investissent plus de ressources dans la production de racines fines au détriment de la production de biomasse aérienne (Bouttier *et al.*, 2014).

Le cernage racinaire s'est avéré efficace dans différents contextes pour augmenter le rendement des cultures. Par exemple, dans un SAI au Missouri composé d'érables argentés et de maïs, le cernage racinaire a permis de limiter la concurrence souterraine pour l'eau et d'augmenter le rendement en grains du maïs près des rangées d'arbres (Miller et Pallardy, 2001). Les chercheurs ont en effet remarqué que le taux d'activité photosynthétique du maïs près des rangées d'arbres cernées était le même que celui des plants situés au centre de l'allée cultivée lorsque le soleil était à son zénith. Une autre étude réalisée au Nebraska a montré que le cernage racinaire d'une haie brise-vent a augmenté le contenu en eau et le rendement d'une culture de soya à proximité de la haie (Hou *et al.*, 2003). Par contre, dans un SAI à base de noyers en France, le cernage n'a pas eu d'effet concluant sur le rendement du blé et de l'orge (Inurreta-Aguirre *et al.*, 2022). À ma connaissance, l'effet du cernage racinaire sur les taux d'infiltration de l'eau en SAI n'a pas encore été étudié.

En dépit d'une compétition arbre-culture pour l'eau près des arbres dans un SAI en Ontario, des chercheurs y ont mesuré une plus grande stabilité des rendements du soya face à la diminution de la disponibilité de l'eau dans le sol comparativement à un témoin agricole dépourvu d'arbres (Nasielski *et al.*, 2015). Le phénomène de redistribution hydraulique par les arbres peut expliquer en partie l'augmentation de la stabilité des rendements en SAI via une amélioration de l'humidité du sol durant les

périodes plus sèches. La redistribution hydraulique est définie comme le mouvement passif de l'eau au travers du tissu racinaire des arbres en suivant généralement un gradient potentiel de l'eau; de l'horizon le plus humide vers un horizon plus sec (Bayala et Prieto, 2020). Ce processus est généralement observé dans les climats semi-arides et peut potentiellement opérer en climat tempéré lors d'un événement sévère de sécheresse (Bayala et Prieto, 2020 ; Töchterle *et al.*, 2020). Comme la disponibilité de l'eau du sol peut être un facteur déterminant du rendement des cultures dans les SAI (Reynolds *et al.*, 2007), davantage de recherches sont nécessaires pour y quantifier sa variation spatiale et temporelle.

1.2.2 Effets des rangées d'arbres sur les conditions microclimatiques

L'évapotranspiration représente le flux hydrique de l'eau du sol vers l'eau atmosphérique, combinant l'évaporation au sol, la transpiration de la végétation et l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation. Un flux d'évapotranspiration élevé peut limiter la disponibilité de l'eau dans le sol pour la végétation. La magnitude du flux est déterminée par la turbulence (la vitesse du vent), l'énergie (principalement l'énergie solaire), l'eau disponible (les précipitations non-interceptées et la capacité de stockage de l'eau des sols) et la demande évaporative atmosphérique (le déficit de pression vapeur – VPD). Les prochains paragraphes expliqueront comment les rangées d'arbres des SAI peuvent influencer les paramètres de l'évapotranspiration et son effet subséquent sur l'eau disponible pour les cultures.

Les rangées d'arbres peuvent être perçues comme une série d'obstacles poreux qui créent des zones de protection des cultures et des sols, où la vitesse du vent est réduite. La magnitude de la protection du vent dépend de la taille des arbres, du stade de développement foliaire des arbres, de la végétation pérenne sous la rangée d'arbres et de la direction et de la vitesse du vent (Brandle *et al.*, 2022). La dynamique de protection du vent des systèmes agroforestiers a surtout été étudiée avec les haies brise-vent et peu en SAI. Une rare étude sur le sujet est celle de Kanzler *et al.* (2019), qui a eu lieu en Allemagne dans un SAI composé de bandes de jeunes peupliers (3 m de hauteur) cultivés en courtes rotations. Même si la taille et l'arrangement spatial des arbres de cette étude diffèrent de ceux des SAI expérimentaux testés dans ce projet de maîtrise, elle demeure utile pour comprendre la variation spatiale de la vitesse du vent dans le SAI. Les auteurs ont observé que la vitesse du vent ($> 1 \text{ m s}^{-1}$) entre 3 et 15 m de la rangée d'arbres était significativement plus faible que celle dans le témoin agricole. Une réduction du vent maximale, quantifiée à -70 % en comparaison au témoin, a été observée dans les premiers 9 m en aval des rangées d'arbres et dans le premier 3 m en amont. Dans les champs protégés

par des haies brise-vent, la zone de protection des arbres peut s'étendre jusqu'à 10 à 20 fois la hauteur des arbres dans le champs en aval de la haie (Brandle *et al.*, 2022).

La disponibilité de la lumière dans le SAI est aussi un élément important à prendre en considération; il s'agit d'un facteur déterminant pour la productivité des cultures en plus d'influencer la température de l'air et du sol (Carrier *et al.*, 2019 ; Sutterlütli *et al.*, 2023). Près des arbres, l'interception de la lumière par leur structure aérienne peut se traduire par une forte réduction du rayonnement photosynthétiquement actif, ce qui se traduit par une réduction du taux de photosynthèse et du rendement des cultures (Thevathasan et Gordon, 2004). Kanzler *et al.* (2019) ont indiqué que la disponibilité de la lumière est la plus faible dans la zone située entre la rangée d'arbres et une distance équivalant à la moitié de la hauteur moyenne des rangées d'arbres (H; 0H à 1/2H), intermédiaire entre 1/2H et 1H et maximale à des distances au-delà de 1H. Dans les SAI où les précipitations sont fréquentes et abondantes, la productivité des cultures sera principalement limitée par la compétition pour la lumière (Carrier *et al.*, 2019).

L'effet de la compétition pour la lumière sur la productivité des cultures varie en fonction des espèces composant le SAI. Dans un premier temps, l'ombrage a un effet sur la productivité agricole qui diffère en fonction du type de voie métabolique utilisée par la culture pour la fixation du carbone. Les plantes C3, telles que plusieurs espèces fourragères et de grandes cultures annuelles, atteignent un seuil d'activité photosynthétique à près de 50 % de la pleine lumière disponible (Jose *et al.*, 2004 ; Reynolds *et al.*, 2007). Par exemple, une étude a montré que les rendements du trèfle blanc et de la luzerne à un ombrage de 50 % étaient comparables à ceux en pleine lumière (Ehret *et al.*, 2015). En revanche, certaines plantes C4, telles que le maïs, augmentent de façon linéaire leur taux de photosynthèse en fonction de l'augmentation de l'intensité lumineuse, ce qui fait en sorte que leur rendement peut rapidement chuter à proximité des arbres qui atteignent une certaine maturité (Jose *et al.*, 2004 ; Thevathasan et Gordon, 2004). On retrouve également des différences au niveau du rendement au sein des plantes C3. Les plantes fourragères pérennes et les céréales d'hiver produiraient des rendements plus élevés en SAI que certaines cultures annuelles comme le soya. Ceci s'explique par le fait que les céréales d'hiver sont semées à l'automne et grandissent rapidement au printemps suivant alors que la surface foliaire de la canopée des arbres n'est pas encore entièrement développée et que la concurrence pour la lumière entre les arbres et la culture est plus faible (Pardon *et al.*, 2018 ; Thevathasan et Gordon, 2004). Dans un deuxième temps, les différences d'espèces d'arbres composant la rangée d'arbres auront aussi un

impact sur la disponibilité de la lumière. L'interception de la lumière dépend notamment de la forme, de la surface foliaire et de la hauteur des cimes des arbres (Reynolds *et al.*, 2007). À des âges équivalents, les espèces à croissances rapides comme le peuplier diminuent davantage la disponibilité de la lumière et créent des zones d'ombrage plus étendues dans les allées cultivées que les feuillus à croissance modérée comme le chêne rouge (Bouttier *et al.*, 2014).

En SAI, l'ombrage des arbres entraîne généralement une diminution de la température du sol et de l'air (Sutterlütti *et al.*, 2023). En revanche, la diminution de la vitesse du vent au centre de l'allée cultivée peut favoriser l'augmentation de la température du sol et de l'air en limitant l'advection de la chaleur et de l'humidité dans l'air au-dessus des cultures (Campi *et al.*, 2009 ; Jacobs *et al.*, 2022 ; Markwitz *et al.*, 2020). Dans un SAI tempéré à larges allées cultivées (48 m), une augmentation de la température de l'air a aussi été mesurée à proximité d'une haie de peupliers lors des journées plus fraîches du printemps, ce qui a favorisé une croissance précoce des cultures (Kanzler *et al.*, 2019). La diminution des radiations solaires sous la rangée d'arbres contribue à limiter les variations de températures de l'air et du sol (Castillo *et al.*, 2020 ; Kanzler *et al.*, 2019).

L'interception des précipitations est une composante de l'évapotranspiration. Il s'agit de l'évaporation de l'eau accumulée sur la structure végétale aérienne. Elle constitue une fraction considérable de l'évapotranspiration qui est modulée par deux facteurs : la canopée des arbres (type et stade de développement de la canopée) et les caractéristiques des événements pluvieux (intensité, durée, fréquence et forme de la précipitation) (Dingman, 2002). Une étude a montré que l'interception des précipitation par une haie brise-vent en climat tempéré peut varier entre 30 et 100 % pour les événements pluvieux cumulant moins de 5 mm durant la saison de croissance et que ce pourcentage est appelé à diminuer avec l'augmentation de la quantité des précipitations (Ghazavi *et al.*, 2008). L'interception contribue donc à réduire la disponibilité de l'eau dans la zone proche des arbres comparativement à celle proche du centre des allées (Sahin *et al.*, 2016). L'effet de l'interception sur la disponibilité de l'eau dans le sol pour les cultures est plus élevé du côté protégé par les arbres que du côté face au vent (Brandle *et al.*, 2022).

De plus, le déficit de pression vapeur (VPD) est l'un des facteurs influençant l'eau disponible pour les cultures. Le VPD correspond à la différence entre la valeur d'humidité maximale que l'air d'une certaine température peut retenir et l'humidité ambiante (Dingman, 2002 ; Hillel, 2003 ; Kanzler *et al.*, 2019). Il

dépend de l'humidité relative et de la température de l'air. En ce sens, les arbres dans les SAI peuvent diminuer le VPD grâce à leur effet brise-vent. Celui-ci contribue à la conservation de l'humidité dans la couche d'air au-dessus des cultures et à la réduction de la température pendant le jour. Pour une valeur élevée de VPD (p. ex. 2 kPa et plus), les plantes accélèrent leur taux de transpiration tant et aussi longtemps que l'eau est disponible (Gates *et al.*, 1998). Lorsque la valeur de VPD est supérieure à 2 kPa, il est aussi possible d'observer une réduction considérable du taux de photosynthèse ainsi que l'apparition de lésions indirectement causées par la chaleur, ce qui peut possiblement mener au flétrissement de la plante (Gates *et al.*, 1998). Des valeurs de VPD supérieures à 2 kPa ont été observées moins souvent en SAI qu'en parcelle agricole conventionnelle dépourvue d'arbres (Kanzler *et al.*, 2019).

Près du centre de l'allée cultivée, les effets du SAI sur le rendement sont indirectement influencés par la régulation du microclimat. Pour tout type de culture, les rendements augmentent généralement avec l'augmentation de la distance de la rangée d'arbres, surtout dans les systèmes composés d'arbres qui ont atteint une certaine taille susceptible d'influencer significativement les conditions environnantes (Carrier *et al.*, 2019). Ce phénomène serait peut-être dû à l'augmentation de la température, la diminution de l'évaporation et un plus grand contenu de l'eau du sol qui induit une photosynthèse accélérée chez des cultures (Kanzler *et al.*, 2019). Dans les allées cultivées en SAI, la réduction de la vitesse du vent atténue l'advection de l'humidité et de la chaleur loin des cultures, ce qui contribue à diminuer le VPD, l'évapotranspiration et à augmenter la productivité des cultures (Pardon *et al.*, 2018).

1.2.3 Effets des conditions sèches et de la disponibilité de la lumière sur la physiologie des espèces fourragères à l'étude

Dans le cadre de ce projet, les espèces fourragères se divisent en deux grandes catégories : la luzerne et les graminées. Les trois espèces de graminées à l'étude sont la fléole des prés (*Phleum pratense* L.), la fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) et le brome des prés (*Bromus biebersteinii* Roem. & Schult.). Il s'agit de graminées complémentaires à plusieurs égards (i.e. tolérance au froid, à la chaleur, au stress hydrique) dans le but d'augmenter la résilience du peuplement sur un gradient de conditions climatiques (Casler *et al.*, 2020). Sans déficit hydrique, la lumière devient généralement le facteur prévalent limitant la croissance et le développement des espèces fourragères. L'évapotranspiration potentielle est souvent fortement et positivement corrélée avec le rendement de la luzerne alors que la productivité des graminées fourragères, plus particulièrement celle de la fléole des prés, est plutôt sensible aux périodes chaudes estivales (Doyle, 2023 ; Undersander, 1987). La tolérance à l'ombre des

plantes fourragères varie largement en fonction des espèces. Dans une expérience avec ombrières artificielles, sous 45 % disponibilité lumineuse totale disponible, on a observé une augmentation du rendement de la luzerne et de la fléole des prés alors que le genre *Festuca* n'a pas été significativement affecté (Pang *et al.*, 2019). Sous le seuil de 45% de la lumière disponible, la biomasse sèche de la luzerne a diminué, sans toutefois que sa survie ne soit affectée. Il semble donc que les espèces de graminées soient généralement plus tolérantes à l'ombrage que les espèces légumineuses (He *et al.*, 2022 ; Pang *et al.*, 2019).

Lors de déficit hydrique, les plants de luzerne peuvent ralentir leur croissance aérienne par le biais de différents ajustements morphologiques, phénologiques et physiologiques (Anower *et al.*, 2017). Malgré ce ralentissement de croissance, le système racinaire profond de la luzerne lui permet de survivre aux périodes de stress hydriques (Del Pozo *et al.*, 2017 ; Doyle, 2023). Le rendement de graminées est sensible au contenu en eau du sol : une plus grande humidité du sol mène directement à une augmentation de leur rendement alors qu'à l'inverse, un stress hydrique peut réduire significativement leur production de biomasse sèche (Gelley *et al.*, 2020 ; Kørup *et al.*, 2018 ; Staniak et Kocoń, 2015).

Outre le rendement, la valeur nutritive du mélange fourrager est un facteur d'importance pour l'optimisation de la productivité laitière. Les protéines et les glucides présents dans le contenu cellulaire sont à favoriser alors que les fibres qui constituent les parois cellulaires sont difficilement digestibles (Doyle, 2023 ; Putnam et Orloff, 2014). La valeur nutritive varie en fonction de la phénologie de la plante. Par exemple, dans les cellules des feuilles, on retrouve plus de protéines et de glucides que dans les cellules fibreuses des tiges (Putnam et Orloff, 2014). De manière générale, la valeur nutritive des légumineuses telles que la luzerne est supérieure à celles des graminées fourragères (Doyle, 2023). Sous ombrage, les sucres issus de la photosynthèse sont dédiés à l'exploration aérienne par un développement accru de la paroi cellulaire secondaire, ce qui laisse une fraction d'énergie disponible pour le développement du contenu cellulaire (Angadi *et al.*, 2022). Ceci engendre une diminution de la qualité des mélanges fourragers en augmentant le nombre de fibres et réduisant les glucides non-structuraux. Chez la luzerne, Lin *et al.* (2001) ont observé qu'un ombrage de 50 % a augmenté significativement les fibres acides et neutres, a réduit significativement le ratio feuille:tige et n'a eu aucun effet sur le contenu en protéines. Ils ont observé, chez les graminées fourragères, une légère augmentation des protéines brutes à un ombrage de 50 % et une augmentation significative à 80 % d'ombrage (Lin *et al.*, 2001).

La valeur nutritive du mélange fourrager n'est généralement affectée qu'à une certaine intensité de déficit en eau dans le sol. Par exemple, dans un essai au champ réalisé au Colorado (États-Unis) un déficit d'irrigation de 60 % de la quantité d'eau évapotranspirée n'a eu aucun effet significatif sur la valeur nutritive de la luzerne, de la fétuque élevée et du brome des prés (Doyle, 2023). Un déficit en eau résulte en un ralentissement de la croissance et une accélération de la sénescence, ce qui entraîne une prépondérance de tiges par rapport aux feuilles et une augmentation des protéines brutes (Catunda *et al.*, 2022 ; Jafarian *et al.*, 2016). Chez les graminées, le déficit hydrique engendre une augmentation des protéines brutes, tout en diminuant les glucides hydrosolubles. L'effet du stress en eau sur les fibres des graminées varient en fonction des espèces de plantes fourragères (Catunda *et al.*, 2022 ; Sheaffer *et al.*, 1992). Les effets négatifs du stress hydrique sur la valeur nutritive sont généralement plus prononcés chez la luzerne que chez les graminées fourragères puisque l'activité des rhizobiums, bactéries symbiotiques spécifiques aux légumineuses, est immédiatement affectée par le stress hydrique (Catunda *et al.*, 2022).

2. OBJECTIF ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

L'objectif général de ce projet est d'évaluer la dynamique spatiale et temporelle des conditions microclimatiques, de l'eau du sol et de la productivité fourragère en SAI, avec ou sans cernage des racines des arbres. Afin de répondre à cet objectif, un SAI expérimental (50 arbres ha⁻¹) ayant atteint une certaine maturité (peupliers à plus du 2/3 de leur âge de récolte) sera étudié. Les variables seront mesurées à différentes périodes, à différentes distances des rangées d'arbres et dans des témoins agricoles. L'évaluation de l'effet du cernage racinaire des arbres permettra de mieux comprendre les interactions aériennes et souterraines vis-à-vis de l'hydrologie en SAI et de formuler des recommandations pratiques en vue d'optimiser le rendement que ces systèmes peuvent offrir dans un climat en changement. Le projet se divise en quatre hypothèses (H) listées ci-dessous. Des prédictions (P) ont été formulées pour chacune de ces hypothèses.

Le SAI génère des conditions édaphiques qui favorisent la disponibilité en eau dans le sol (H1). La teneur en matière organique du sol est plus élevée près des arbres que dans les témoins (H1.P1). Étant donné une densité apparente plus faible à proximité des arbres et plus élevée dans les témoins, l'infiltration à saturation et à quasi-saturation est plus élevée à proximité des arbres que dans les témoins (H1.P2).

Le SAI génère des conditions microclimatiques qui contribuent à augmenter la disponibilité en eau dans le sol (H2). Le SAI réduit la disponibilité de la lumière, la vitesse du vent et le déficit de pression de vapeur, ce qui contribue à diminuer l'évaporation potentielle de manière décroissante au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre des allées cultivées et sera la plus élevée dans les témoins agricoles (H2.P1).

Étant donné l'influence du SAI sur les conditions édaphiques et microclimatiques, le SAI augmente la disponibilité en eau (H3). La disponibilité de l'eau du sol sera la plus élevée près du centre des allées cultivées (12 et 20 m) que près de la rangée d'arbres (0 et 4 m) et dans les témoins ; l'effet de la distance par rapport à la rangée d'arbres sera exacerbé durant les périodes plus sèches (H3.P1). En diminuant le prélèvement de l'eau par les arbres, le cernage racinaire augmente la disponibilité de l'eau à proximité de la rangée d'arbres (4 m) en comparaison aux parcelles non-cernées ; l'effet du cernage sera exacerbé durant les périodes plus sèches (H3.P2).

Le SAI et le cernage racinaire augmentent le rendement et la valeur nutritive de la culture fourragère et ce, de manière plus importante lors de périodes plus sèches (H4). Étant donné les conditions limitantes de lumière et d'eau, le rendement et la valeur nutritive de la culture à proximité de la rangée d'arbres (4 m) seront inférieurs à ceux du centre de l'allée cultivée et dans les témoins agricoles, et ces effets seront plus prononcés chez la luzerne que chez les graminées (H4.P1). Le cernage racinaire augmentera le rendement et la valeur nutritive à proximité de la rangée d'arbre (4 m) en comparaison aux parcelles non-cernées (H4.P2). Étant donné une disponibilité en eau accrue et une lumière suffisante vers le centre de l'allée cultivée (12 et 20 m), un rendement et une valeur nutritive plus élevés seront observés à ces distances, et l'effet sera accru durant les périodes plus sèches (H4.P3).

3. MATERIALS AND METHODS

3.1 Study site

The experimental site was located near Baie-du-Febvre (46°08'N, 72°43'W; ca. 30 m above sea level), in southwestern Québec, Canada. The 30-year climate normals (1981–2010) for the area are 5.3 °C for annual average temperature and 924 mm for annual precipitation (Nicolet weather station, 46° 13' N, 72° 39' W; Government of Canada, 2023). The flat terrain has moderately good drainage. The soil is classified as a Gleysol (Soil series: Rideau clay with surface sandy patches; Laplante and Choinière, 1954; Soil Classification Working Group, 1998) with loamy sand texture (75 % sand, 8 % clay), 4.5 % organic matter, and bulk pH of 5.9 in the uppermost 20 cm.

The experimental site was established within an 11-ha field (560 x 200 m) with subsurface drainage, where a tree-based intercropping (TBI) system had been established in 2012 (Figure S6.1). The TBI system consisted of three single rows of trees (northwest-southeast orientation) that were each 400 m long. The rows were composed of high-value hardwoods, which alternated with plantings of fast-growing hybrid poplar (*Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall x *Populus nigra* L.). Hardwood trees consisted of species showing similar moderate growth (sugar maple, *Acer saccharum* Marshall; black walnut, *Juglans nigra* L.; northern red oak, *Quercus rubra* L.; swamp white oak, *Quercus bicolor* Willdenow; bur oak, *Quercus macrocarpa* Michaux; shagbark hickory, *Carya ovata* [Mill.] K.Koch), which were distributed randomly in the TBI system but always interspersed with hybrid poplar. Trees were installed at 5-m spacing within the row and 40 m spacing between rows, corresponding to a density of 50 trees ha⁻¹. In September 2021 (*i.e.*, 10 years after tree planting), average height and diameter at breast height (DBH, height = 130 cm) of poplars were respectively 16.1 m and 33.4 cm, while those of hardwoods were 6.4 m and 9.7 cm. Since planting, poplars and hardwoods have been maintained by annual shape pruning (*e.g.*, removal of forks to maintain one single straight stem) and branch pruning (to less than one-third of the tree height). Uncultivated strips (*ca.* 2 m-wide) were maintained under the tree rows and left unmown since implantation. These uncultivated strips consisted mainly of alfalfa (*Medicago sativa* L.), Canada goldenrod (*Solidago canadensis* L.), common milkweed (*Asclepias syriaca* L.) and greater burdock (*Arctium lappa* L.). In alleyways and in the rest of the field, a mixture of alfalfa, timothy (*Phleum pratense* L.), tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) and meadow brome grass (*Bromus biebersteinii* Roem. & Schult.) was no-till seeded on May 2nd, 2021. Seeding rates were 13, 8, 4 and 4 kg ha⁻¹ for alfalfa, timothy, tall fescue and meadow brome grass, respectively. The soil was fertilized in autumn (end of October)

2020 and 2021 with 36 Mg ha⁻¹ of liquid dairy cattle manure, which provided for each application *ca.* 68 kg ha⁻¹ of nitrogen, 133 kg ha⁻¹ of potassium and 18 kg ha⁻¹ of phosphorus fertilizer. Forages were harvested three times in 2021 (18 June, 3 August, 25 October) and in 2022 (20 June, 22 July, 27 August) at a 7-cm height. Previous crops were maize (*Zea mays* L.; 2017), soybean (*Glycine max* [L.] Merrill; 2018 and 2019) and winter rye (*Secale cereale* L.; 2020).

3.2 Experimental Design

The experimental design was divided into three replicated blocks (B). In each block, the TBI system was compared to an adjacent agricultural control (without trees) that included the same forage crop with the same agricultural history and management (Figure S6.1). Control plot in block 1 was south of the TBI system, while control plots in blocks 2 and 3 were east of the TBI system. The TBI system and control were divided into two root-pruning treatments: without pruning *versus* with pruning. Root pruning was conducted at the end of April 2021 and 2022, which corresponded to the beginning of the growing season, using a subsoiler (75 cm depth). In the TBI system, root pruning was implemented 2.5 m from the tree row on both sides, over a length of 40 m (Figure 3.1). In each root pruning treatment, there was one transect on each side of the row and conditions were compared at five positions: 0 m (*i.e.*, under the tree row), 4 m, 12 m, 20 m (*i.e.*, alley centre) from the tree row and agricultural control (*i.e.*, > 40 m from the nearest tree) (Figure 3.1).

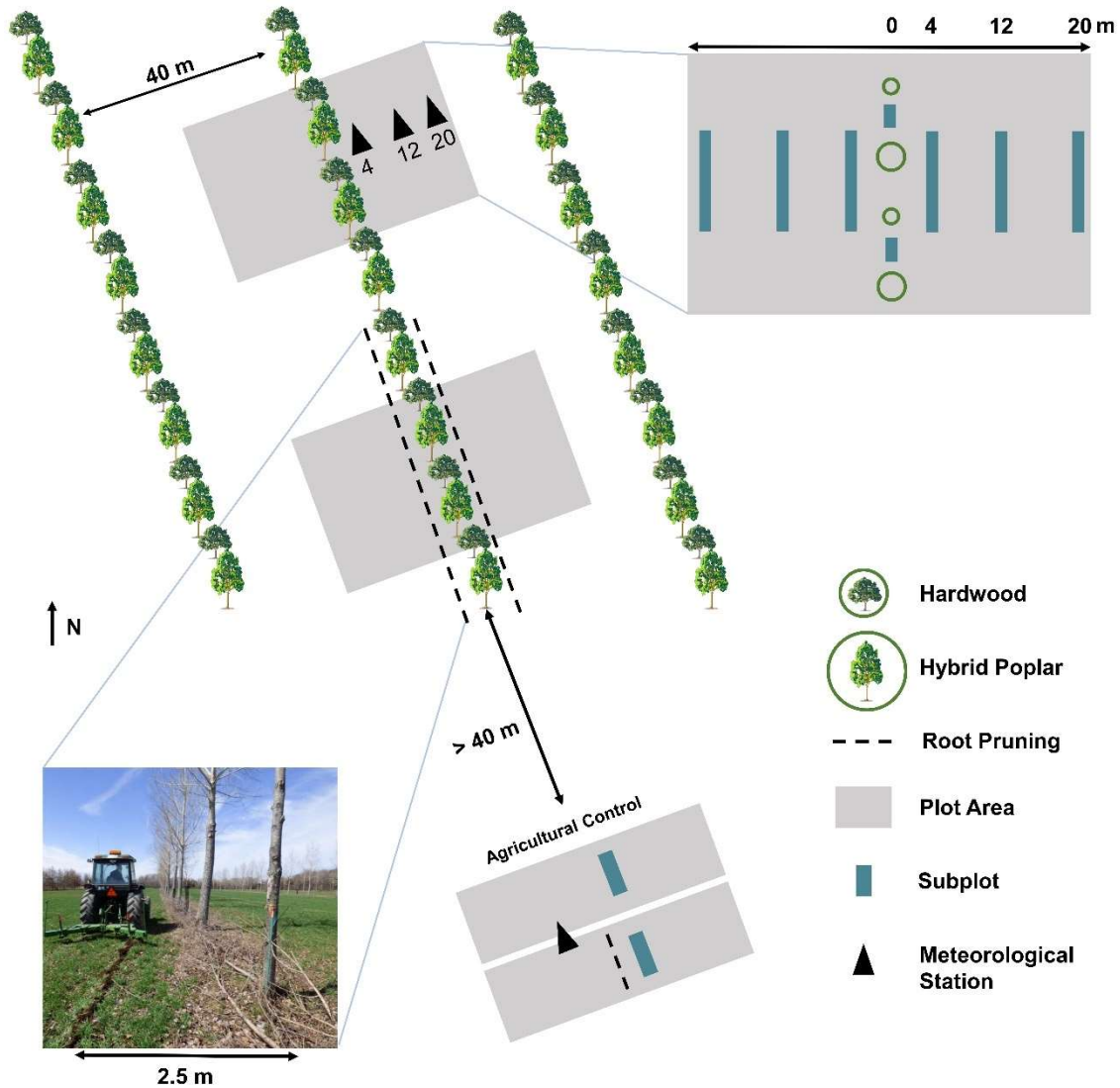


Figure 3.1 Block (not to scale) of the experimental design implemented in 2021 and 2022 in the tree-based intercropping system. Blocks were replicated three times, for a total of 60 subplots. Control plots were located at least 40 m away from trees. Edaphic characteristics and percentage of total light transmittance were measured at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row following subplot configuration. Yield quality and quantity were measured in all cultivated subplots, *i.e.*, all subplots except those underneath tree row (48 subplots). Meteorological stations were installed in two of three blocks, east of the tree row in the TBI system and at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row.

3.3 Field measurements

3.3.1 Soil properties

In 2022, within each subplot (Figure 3.1), soil properties were determined in the uppermost 20 cm. Bulk density (g cm^{-3}) was determined over a dried 90.59 cm^3 soil sample (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2017). Six soil cores (7-cm diameter) were collected with an Edelman auger, with each sample being taken at equivalent distance across each subplot. These six samples were mixed together in the field to form a single composite sample, which was sieved to pass a 2-mm mesh in the laboratory. Proportions of sand, silt and clay (i.e. texture) and soil organic matter of the composite samples were then determined, the former with the Bouyoucos (1962) hydrometer method and the latter with the loss-on-ignition method for 16 hours at 375°C (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, 2003).

Using both a mini disk infiltrometer (water potential of -2 cm) and double-ring infiltrometer (constant water level approach by manual adjustment; inserted at a depth of 5 cm within soil), near-saturated state hydraulic conductivity (K_{nsat} , mm min^{-1}) and saturated hydraulic conductivity (K_{sat} , mm min^{-1}) were respectively assessed in each subplot (Decagon Devices Inc, 2011 ; Royal Eijkelkamp, 2023). Soil volumetric water content (VWC) measurements were taken prior to every infiltration test over a 7.5 cm depth using a Field Scout TDR 350 Soil Moisture Meter (Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA). Each K_{nsat} test was conducted no less than 48 hours following a rain event.

3.3.2 Potential evaporation

Piché evaporimeters (non-covered) were installed on multiple rainless 24-hour periods in 2021 (on July 2nd, 3rd, 4th and 27th; on September 16th and 30th) and in 2022 (on July 9th and 29th; on August 14th; on September 1st). The configuration of the Piché evaporimeters and the groupings of random blocks differed from that presented in Figure 3.1. The evaporimeters were placed in 16 subplots in the study site (2 blocks \times 4 distance groups \times 2 orientations). In control plots, one evaporimeters was placed near the root-pruning (RP), while the other was in the non-pruned (NP) area of the plot. Within TBI, evaporimeters were placed at 4 m, 12 m and 20 m in four transects: B1-RP-East, B2-RP-West, B2-NP-East and B3-NP-West. Plots were not selected to assess root pruning differences, given that root pruning did not affect tree development (Gagné *et al.*, 2022). Instead, plot selection was guided by vigour of the surrounding trees. Two random blocks were created, represented by the second and third alleyways

with associated control plots (B1 and B3 control plots, respectively), contrary to the blocks used for all the other variables that were centered on tree row (as shown in Figure S6.1). To normalize water loss by evaporation, each volume of evaporated water was divided by the exact time difference between installation and retrieval of the specific observation. The resulting rate of evaporation (mL h^{-1}) corresponds to the evaporation rate when water is not limited; hence, potential evaporation is measured instead of actual evaporation.

3.3.3 Percent of total light transmittance (PTLT)

In September 2022, three hemispherical photographs were taken in each subplot at 1 m above ground level using a digital camera (Nikon Coolpix 995, Tokyo, Japan) that was equipped with a hemispherical lens (Nikkor fisheye converter FC-E8). PTLT was estimated using Gap Light Analyzer (Frazer *et al.*, 1999). We used a single location, a temporal resolution of 1 min and a spatial resolution of 36 azimuths per 9 zeniths. PTLT represents the absolute amount (direct and diffuse) of radiation in $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ over the growing season found below the canopy and topographic mask (none in our case) that was contributed by each sky region.

3.3.4 Microclimatic conditions

Eight meteorological stations (Watchdog ©, Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA) and attached data loggers (Hobo MX2301A ©, Onset, Bourne, MA, USA) recorded data from June 8th to October 6th in 2021 and from May 11th to October 26th in 2022. The stations recorded continuously but were occasionally removed from the study site during harvesting and other mechanical interventions. The meteorological station recorded, among other variables, photosynthetically active radiation (PAR, 400-700 nm, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and windspeed (km h^{-1}). Hobo MX2301A sensors recorded ambient relative humidity (%) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) at one meter above the ground and were covered with two wooden slats, one on top to prevent warming by solar radiation, the other underneath to prevent radiation from the vegetation. Vapour-pressure deficit (VPD) was calculated based on Dingman (2002):

$$[1] \quad VPD = \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \left(0.611 \times \exp\left(\frac{17.3 \times T}{T + 237.3}\right)\right),$$

where RH is relative humidity (%) and T is ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$).

3.3.5 Soil volumetric water content

Soil volumetric water content (%) was measured in the uppermost 7.5 cm of soil using a Field Scout TDR 350 Soil Moisture Meter (Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA). Measurements were taken on multiple occasions during the 2021 growing season (July 27th, September 16th and 30th) and during the 2022 growing season (July 10th and 30th, August 15th and September 2nd). Each measurement consisted of the average of 10 readings taken in each subplot.

3.3.6 Precipitation to potential evaporation ratio for each harvest

To identify harvests that were potentially associated with soil moisture deficits, the precipitation to potential evaporation ratio (P/PET) was calculated over growth periods associated with each forage harvest (Table S6.1) Precipitation was measured from June 8th to October 6th in 2021 and from May 11th to October 26th in 2022 with a 0.25 mm tipping bucket rain gauge that was located in an open area (Rainwise, Boothwyn, PA, USA). Potential evaporation (PET) was estimated from the meteorological data using the Romanenko method that is described in Xu and Singh (2001) :

$$[2] \quad PET = 0.0018 \times (25 + T)^2 \times (100 - RH),$$

where T is the the daily average air temperature and RH is the relative humidity of the two meteorological stations that were located in control plots (blocks 1 and 2).

Sensors were occasionally blocked or removed from the study site to allow agricultural operations. In those instances, meteorological conditions were estimated from a nearby weather station (Nicolet weather station, 46°13'N 72°39'W, Government of Canada, 2023). By performing linear regression between the data of our study site and the weather station, we developed prediction equations ($p < 0.001$) for daily mean ambient temperature ($N = 227$, $R^2 = 0.99$), daily mean ambient relative humidity ($N = 227$, $R^2 = 0.81$) and cumulative daily precipitation ($N = 364$, $R^2 = 0.85$). The model was constructed so that when 0 mm was recorded at the weather station, the estimate for the study site was systematically considered to be 0 mm.

3.3.7 Forage yield

Forage yield (g m^{-2}) was determined before each cut of the field by the farmer on June 11th, August 2nd and October 22nd in 2021 and on May 30th, July 22nd and August 19th in 2022 using 1 m^2 quadrats per

subplot (random position; $N = 48$ per sampling except for July 2022 with $N = 32$ as block 3 was not sampled). The fresh mass of each quadrat was determined in the field immediately after manually cutting all of the aboveground biomass to 5 cm from the soil surface. Fresh subsamples (about 250 g) were dried to constant mass at 60 °C to calculate forage yield on a dry-mass basis. Manual sorting was performed at each harvest of 2022 to determine the contribution of alfalfa and grasses to forage yield. Non-seeded grass species were included in the grass component, while other weeds were discarded.

To compare the forage yield within the TBI system to that of agricultural controls, a weighted yield was calculated for each of the 12 transects per harvest (3 blocks x 2 root pruning treatments x 2 orientations, which is equivalent to the number of control plots). Considering that the centre of the cultivated alley was at 20 m from the tree row and that one meter right beside the tree row was not cultivated, forage yield at 4 m (from 1 to 8 m), 12 m (from 8 to 16 m) and 20 m (from 16 m to 20 m) represented 37, 42 and 21 % of the total yield within the whole alleyways.

3.3.8 Forage nutritive value

Forage nutritive value was performed on the two last consecutive harvests of 2022, on July 22nd and August 19th. 300-g fresh samples representative of each harvested quadrat were stored at 4 °C before being sent to Eurofins Environex (Longueuil, QC, CA) within the first 24 hours post-harvest. Forage nutritive value sub-samples were scanned by visible near-infrared reflectance spectrometry (VNIRS) measuring their absorbance [$\log(1/R)$, where R is reflectance] in the visible and near-infrared regions between 400 and 2500 nm at 0.5 nm intervals using DS2500 monochromator (Foss NIRSystems ©, Silver spring, MD, USA) (Bélanger *et al.*, 2020 ; Lauzon *et al.*, 2019 ; Pomerleau-Lacasse *et al.*, 2019). The following forage nutritive value attributes were determined from these absorbance spectra: net energy for lactation (Mcal kg^{-1}), crude protein (CP, %), soluble CP (%), acid detergent fiber (ADF, %), heat-stable α -amylase, and sodium sulfite chemically analyzed ash-free neutral detergent fiber (NDF, %) and ash-free undigestible neutral detergent fiber after 240 hours (uNDF, %). Both harvests recorded 48 observations, in all cultivated subplots (contrary to yield, block 3 was sampled for nutritive values on July 22nd).

3.4 Statistical analysis

Mixed effects ANOVA analyses based on generalized linear mixed model (GLMMs) were used to determine the significance of the experimental treatments on measured variables. Significance on prediction variables was determined with ANOVA using type III sums-of-squares. All models assumed a

Gaussian distribution. To achieve residual normality, some independent variables were transformed prior to modelling. When distance to the tree row (*Distance*, categorical variable with four or five levels: 0, 4, 12, 20 m and control) or its interaction was significant ($p < 0.05$), multiple comparisons were automatically made (Tukey's HSD) among distances. When interaction with root pruning was significant, multiple comparisons were performed within each distance grouping. When interaction with the harvest period (*Harvest*, categorical variable) or the date of measurement (*Sampling date*, categorical variable) was significant, multiple comparisons were performed within each *Harvest* or *Sampling date* grouping. The nested random effects controlled for block correlation. The simplest form of model was run for PTLT (Eqn. 3), where the only variable of interest was *Distance*, since it has been shown that tree growth in our TBI system was negligibly affected by root pruning (Gagné *et al.*, 2022).

$$[3] \text{ logit(PTLT)} \sim \text{Distance} + (1|\text{Block})$$

Proportion of sand (*% of sand*, continuous variable) was included as a covariate in all other models. Proportion of sand was selected as a control for soil texture due to its greater variation among subplots than that of silt and clay. The following model (Eqn. 4) was used for bulk density (BD, continuous variable) or organic matter (OM, continuous variable) which considered the root pruning treatment (*Root pruning*, categorical variable with two levels: presence *versus* absence).

$$[4] \text{ BD or OM} \sim \% \text{ of sand} + \text{Distance} \times \text{Root pruning} + (1|\text{Block})$$

For both near-saturated state (K_{nsat}) and saturated (K_{sat}) hydraulic conductivity, soil volumetric water content (VWC) before measurement was added as fixed effect to the model as a second covariate.

$$[5] \text{ log}(K_{nsat} \text{ or } K_{sat}) \sim \% \text{ of sand} + \text{initial soil VWC} + \text{Root pruning} \times \text{Distance} + (1|\text{Block})$$

For K_{nsat} and K_{sat} , a piecewise structural equation model (SEM) was performed to allow comparisons between the direct effects of trees and their indirect effects through soil VWC before measurements (Lefcheck, 2016). Random effects were included, as shown in equation 5. For all variables that were assessed through point measurements (Eqn. 3, 4 & 5), the nested random effects controlled for block correlation.

Repeated measurements variables were modelled according to the following equation:

$$[6] \text{ Variable} \sim \% \text{ of sand} + \text{Distance} \times (\text{Date} + \text{Root pruning}) + (1|\text{Block/Subplot})$$

The factor *Date* corresponds to different variables based on the independent variable of interest; for forage yield and quality variables, *Date* refers to *Harvest*, whereas for soil VWC, it refers to the *Sampling date*. Alfalfa yield, grass yield and their ratio were transformed using square-root transformation to achieve residual normality. Likewise, forage yields were log-transformed. The extensive dataset of soil VWC enabled us to assess the influence of root pruning at each distance, on specific sampling dates. A triple interaction (*Sampling date : Distance : Root pruning*) was added to fixed effects of equation 6 for this variable. The nested random effects control for block correlation and for repeated measurements using the same plot, except for net energy for lactation, % of soluble crude protein and acid detergent fiber, where blocks could not be included because of model convergence problems.

Potential evaporation derived from evaporimeter measurements (*Evaporation Rate*) was divided into high and low potential evaporation intensity with respect to ambient conditions that were recorded in controls (*Potential evaporation intensity*, categorical variable with two levels: high *versus* low). Sand content was retained in the model since soil evaporation is affected by soil texture (An *et al.*, 2018). The nested random effects controlled for block correlation, for repeated measurements using the same plot and for sampling date.

$$[7] \text{ sqrt}(\text{Evaporation Rate}) \sim \% \text{ of sand} + \text{Distance} \times \text{Potential evaporation intensity} \\ + (1|\text{Block/Subplot}) + (1|\text{Sampling date})$$

All available data for PAR, ambient air humidity and temperature, as well as resulting VPD were averaged over each hour of the day to draw daily profiles for each distance from the tree row and controls. Windspeed was profiled in a monthly manner to represent windspeed variation with changing tree phenology.

To integrate all environmental and yield-related measured variables, a redundancy analysis was performed over all 48 cultivated subplots. Environmental matrix compiled PTLT (logit-transformed), soil organic matter, soil bulk density, soil VWC averaged over all measurements of 2022 and near-saturated state and saturated hydraulic conductivity. Yield matrix compiled forage yield, alfalfa yield, grass yield and their ratio were averaged across all harvests of 2022. Forage nutritive value variables were also included and averaged over the last two harvests of 2022.

All analyses were performed in R version 4.2.3 (R Core Team, 2023) with packages “glmmTMB” for mixed models (Brooks *et al.*, 2017), “car” for ANOVA (Fox & Weisberg, 2019), “emmeans” for multiple comparisons (Lenth, 2023), “multcomp” for piecewiseSEM (Hothorn *et al.*, 2008) and “vegan” for redundancy analysis (Oksanen *et al.*, 2022).

4. RESULTS

4.1 Soil properties

Soil organic matter content, bulk density and K_{sat} varied significantly among distances from the tree row, but were generally unaffected by root pruning (Table 4.1). Soil organic matter and K_{sat} beneath the tree row (0 m) were higher than within the cultivated alley (4, 12 and 20 m from the tree row) and in the control (Figure 4.1). Similarly, soil bulk density beneath the tree row (0 m) was significantly lower than in the cultivated alley of the TBI and in the control (Figure 4.1). Soil organic matter (mean \pm standard deviation) in plots with root pruning (4.3 ± 0.1 %) tended ($p = 0.06$) to be lower than plots without root pruning (4.7 ± 0.1 %) (Table 4.1). Unlike other soil properties, K_{nsat} did not significantly vary with distance from the tree row (Table 4.1). Instead, K_{nsat} varied significantly with the proportion of sand and initial soil VWC and these two variables covaried with distance in turn. For example, in the SEM, the distance from the tree row and sand content respectively explained 35 % and 5 % of the variance of initial soil VWC (Figure S6.2). As such, we can see that K_{nsat} generally decreased with the distance from the tree row, as shown in Figure 4.1.

Table 4.1 Mixed-effects ANOVA analysis of generalized linear mixed models for soil properties and microclimatic dependent variables. Potential evaporation and soil volumetric water content were measured at multiple times over both 2021 and 2022 growing seasons. For each model, number of observations (N), marginal (fixed effects only) and conditional (random and fixed effects) R^2 , and p -values are shown. Absence of p -value indicates that predictor variable or interaction was not included in the model. SOM = soil organic matter; BD = bulk density; K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; K_{nsat} = near-saturated hydraulic conductivity; VWC = soil volumetric water content; PTLT = proportion of total light transmittance; PE = potential evaporation; N = number of observations; D = distance from the tree row; SD = sampling date; RP = root pruning; PEi = potential evaporation intensity; \times = interaction between independent variables.

	SOM	BD	K_{sat}	K_{nsat}	VWC	PTLT	PE
N	60	60	60	60	420	60	160
Marginal R^2	0.56	0.56	0.53	0.60	0.82	0.95	0.74
Conditional R^2	0.71	0.56	0.53	0.63	0.91	0.95	0.89
D	< 0.001	< 0.001	0.02	0.65	< 0.001	< 0.001	< 0.001
RP	0.06	0.20	0.54	0.90	0.49		
initialVWC			0.04	0.02			
% Sand	< 0.001	0.65	0.04	< 0.001	< 0.001		< 0.01
SD					< 0.001		
PEi							< 0.001
D \times RP	0.14	0.26	0.72	0.76	0.04		
SD \times D					< 0.001		
PEi \times D							< 0.001
SD \times D \times RP					0.04		

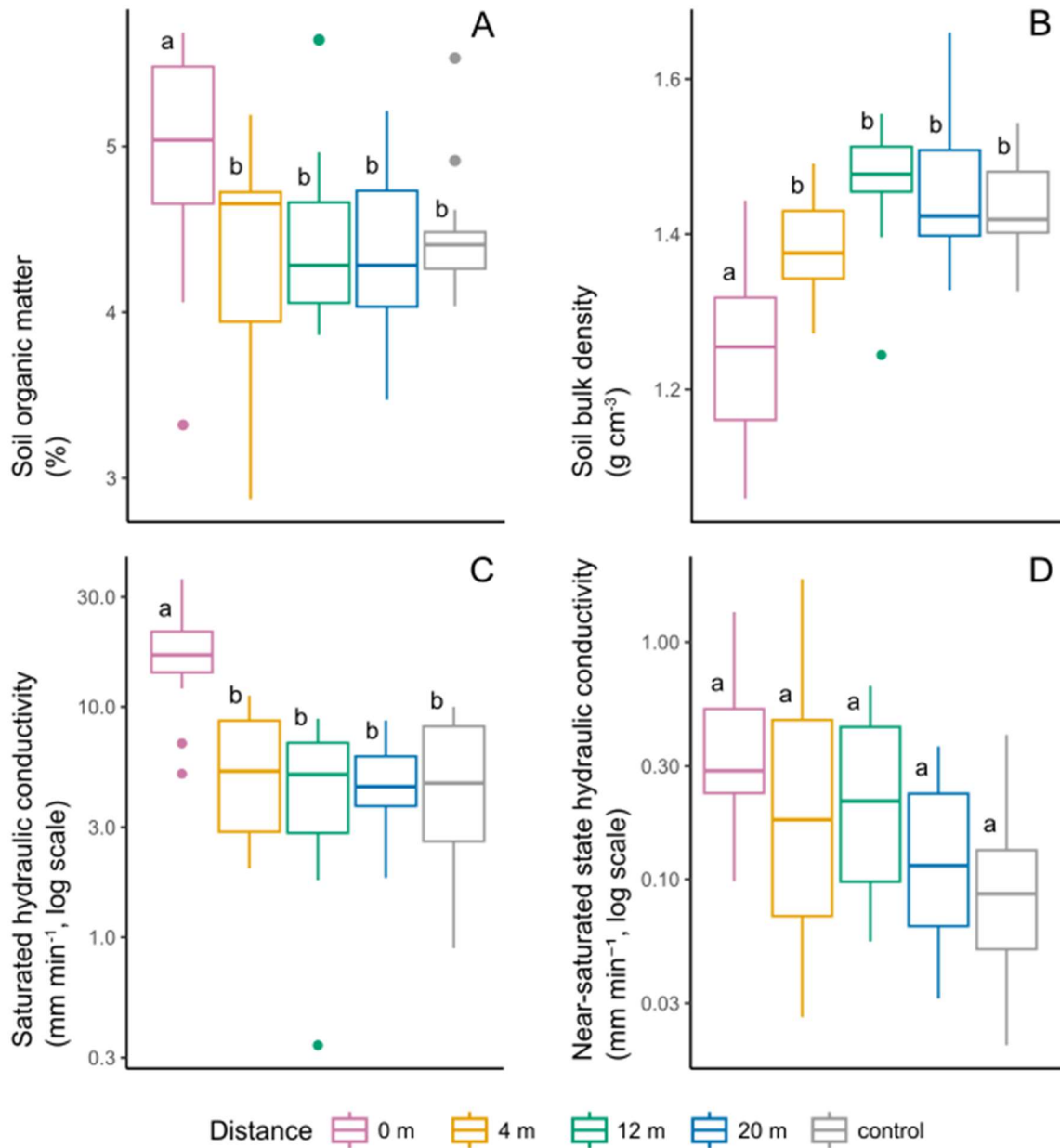


Figure 4.1 Soil organic matter (A), soil bulk density (B), saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) (C) and near-saturated hydraulic conductivity (K_{nsat}) (D) at different distances from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Both K_{sat} and K_{nsat} are scaled logarithmically along the y-axis. Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). Box-and-whisker plots display 25th and 75th percentiles (the inter-quartile range [IQR] from the lower and upper edges of the box), the bold horizontal lines within boxes indicate the 50th percentiles (medians); whiskers below and above boxes indicate largest value no further than $1.5 \times$ IQR from their corresponding quartiles, beyond which dots indicate outliers.

4.2 Potential evaporation

Potential evaporation, measured with evaporimeters, was significantly influenced by distance from the tree row and potential evaporation intensity (Figure 4.2). Under all conditions, potential evaporation at 4 m from the tree row and in controls was significantly higher than that at the centre of the alleys (20 m). When ordering measurements from lowest to highest potential evaporation, we observed differences in the relative position of controls (Figure S6.3). Under conditions of high potential evaporation, controls were significantly higher than the distances near the centre of the alleys (12 and 20 m). Under conditions of low potential evaporation, lower but not significantly different potential evaporation was recorded in controls relative to the distances near the centre of the alley (12 and 20 m).

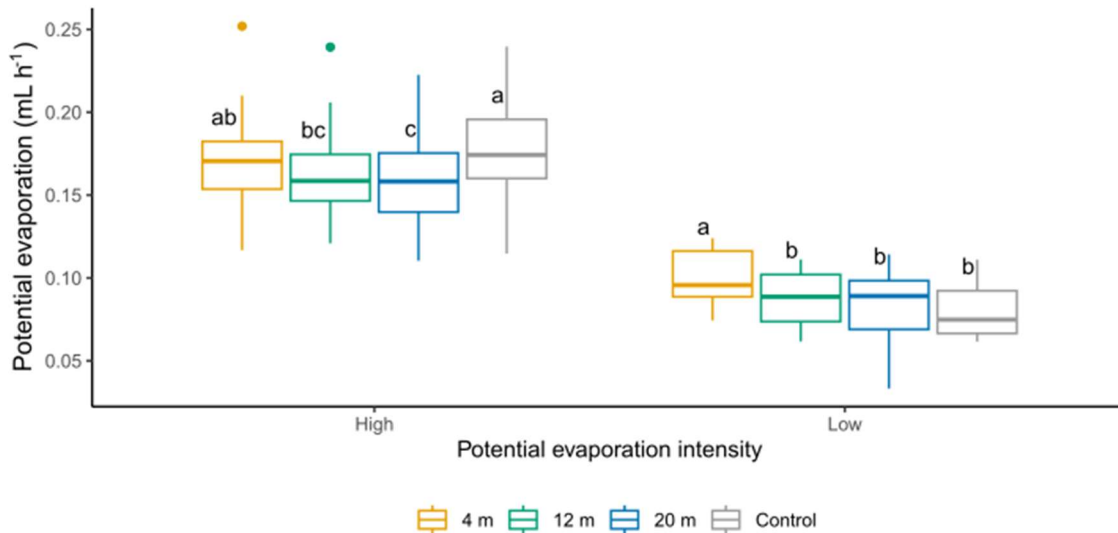


Figure 4.2 Potential evaporation measured with Piché evaporimeters at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control for conditions of high and low potential evaporation. Potential evaporation means were separated over the threshold of 12 ml h⁻¹ (Figure S6.3). Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$).

4.3 Microclimatic conditions

PTLT increased significantly with increasing distance from the tree row (Table 4.1, Figure 4.3). PAR from 10:00 to 15:00 pm at a distance of 4 m from the tree row was substantially reduced compared to other sampling positions (Figure 4.4). For example, PAR near sun zenith (12:00 and 13:00) at 4 m was reduced

by 60 % compared to that in the control. From 11:00 am to 14:00 pm, the air temperature at 4 m was reduced by 5 % compared to the centre of alleyways (20 m) and control. During nighttime (18:00 to 5:00), the air temperature at 4 m was more than 2 % warmer than towards centre of alleyways (12 and 20 m) and control. Relative humidity at 4 m was 2 % higher than centre of alleyways and control from 11 am to 1 pm. This increase in air temperature and relative humidity contributed to a 12 % decrease in the VPD during mid-day hours at 4 m compared to that at the centre of alleyways (20 m) and in controls.

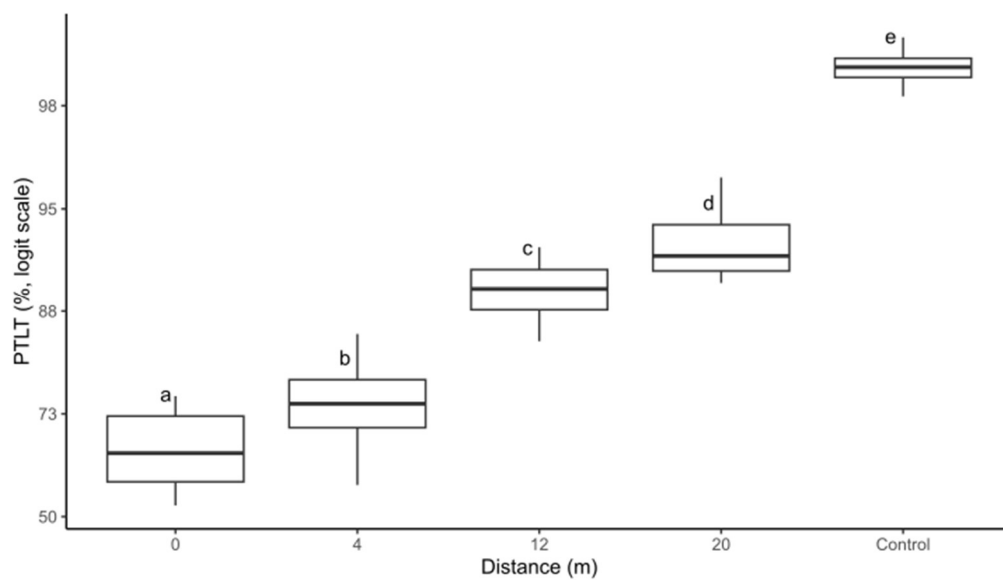


Figure 4.3 Percent total light transmittance (PTLT) at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control in 2022. PTLT is scaled logarithmically along the y-axis. Different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$).

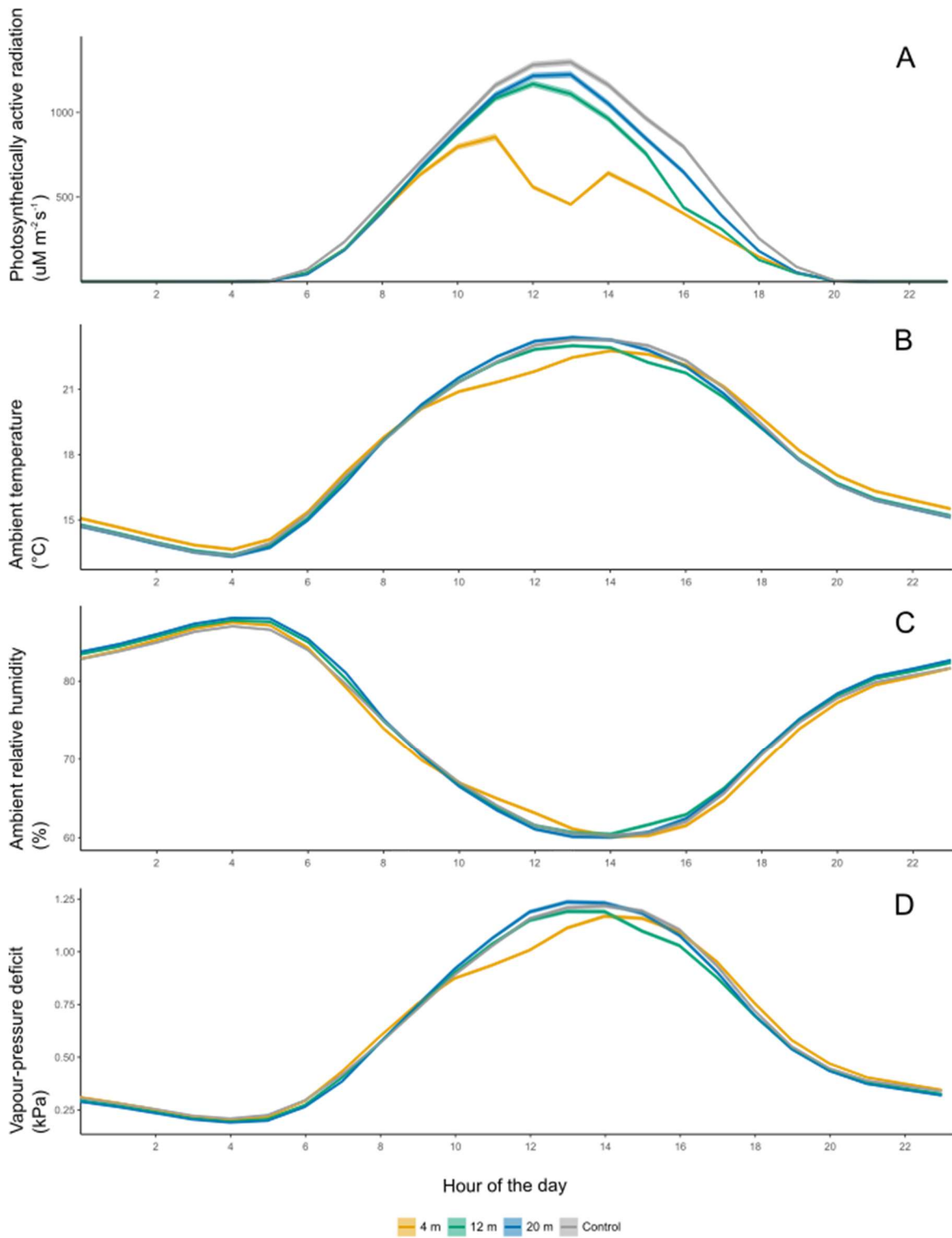


Figure 4.4. Hourly average of photosynthetically active radiation (A), ambient air temperature (B), ambient relative humidity (C), and vapour-pressure deficit (D) at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control during both growing seasons of 2021 and 2022.

In general, windspeed near the alleyway centre (12 and 20 m) was lower than that in control plots across all observed months, with an overall average monthly reduction of 44 % (Figure 4.5). Weaker differences were measured between 4 m and the control, except in May and September 2022.

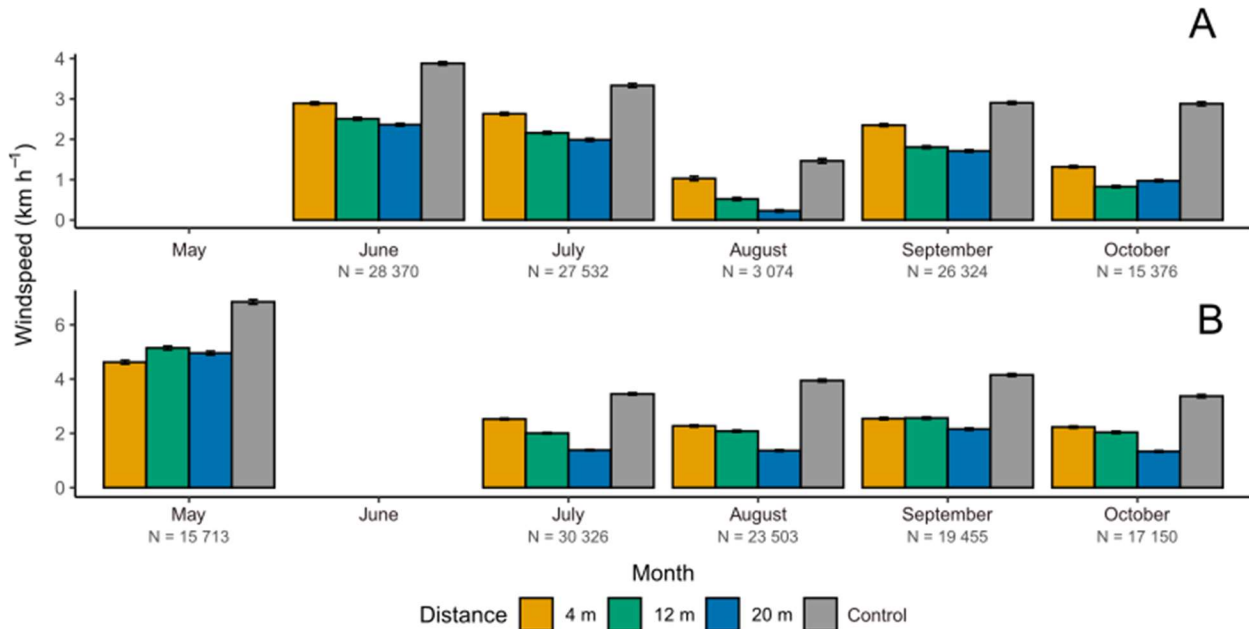


Figure 4.5. Monthly average windspeed in 2021 (A) and 2022 (B) at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Error bars correspond to standard errors of the mean.

4.4 Soil volumetric water content

Soil VWC was significantly influenced by the proportion of sand, the sampling date and the distance from the tree row (Table 4.1). Differences in soil VWC emerged among distances on different sampling dates and the effect of root pruning on VWC varied with distance and sampling date (Figure 4.6). Overall, soil VWC was the lowest at 0 m (9.3 ± 0.2 %), intermediate at 4 m (14.5 ± 0.4 %) and highest at 12 m, 20 m and in the control (mean of 17.4 ± 0.2 % for the latter three distances). This pattern was relatively consistent across sampling dates, although soil VWC at the centre of the alleyway was higher than in controls on both driest (2022-07-10 at 12.4 ± 0.5 %) and most humid (2022-09-02 at 19.0 ± 0.5 %) sampling dates. On average, root pruning increased soil VWC by 21 % at 4 m from the tree row.

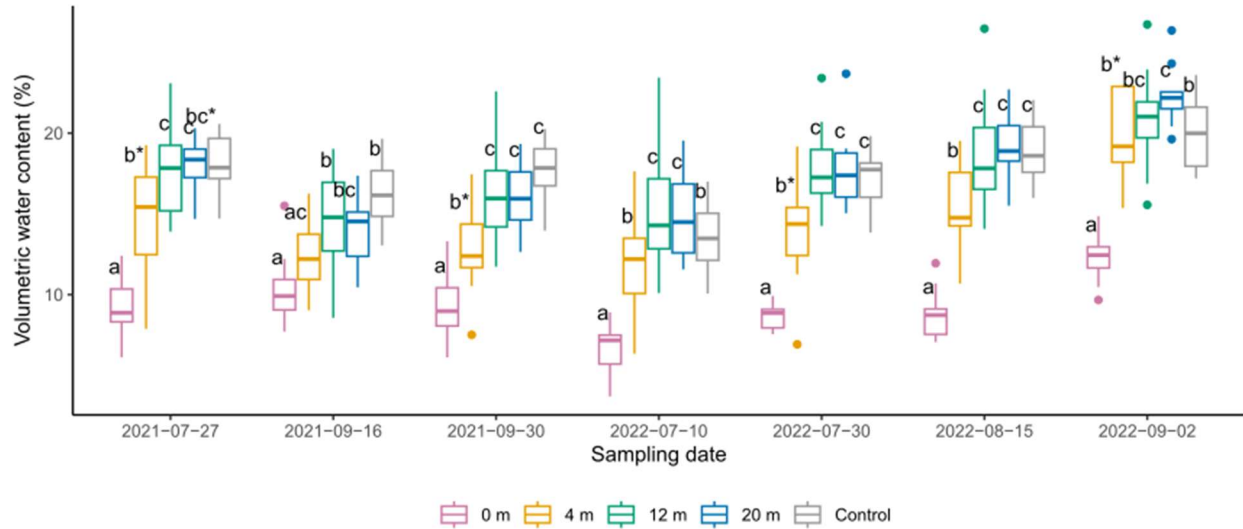


Figure 4.6. Soil volumetric water content at different distances (0, 4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control for each sampling date. Different letters represent a significant difference among distance categories. An asterisk represents a significant difference between the pruning categories of the corresponding distance (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$).

4.5 Forage yield

Forage yield at 4 m was reduced on average by 29 % and 37 % compared to the alleyway centre (12 and 20 m) and to the controls (Table 4.2, Table 4.3), respectively. The effect of root pruning on forage yield varied according to the distance from the tree row (Table 4.2). At 4 m from the tree row, forage yield with root pruning (149 g m^{-2}) was 20 % higher than that without root pruning (124 g m^{-2}). Further away from the tree row (12 and 20 m) and in the control, root pruning did not influence forage yield. Forage yield at each distance (Figure 4.7A) and in each system (weighted average of TBI versus agricultural control, Figure 4.7B) significantly differed by harvest date. At the first harvest, forage yield at 20 m was higher than that in the control. At the second harvest, forage yields were similar among all distances from the tree row. In the subsequent four harvests, despite fluctuating P/PET ratios, forage yield at 4 m was consistently lower than that in the control, while yields at 12 and 20 m did not differ to that in the control. Overall, forage yield was 22 % lower in the TBI system than in the control for 5 out of 6 sampling periods (Figure 4.7B). There was a significant alfalfa yield reduction at 4 m, while grass yield remained constant among distances (Table 4.3).

Table 4.2 Mixed-effects ANOVA of generalized linear mixed models (GLMMs) for forage yield and quality. Yield was measured over both 2021 and 2022 growing seasons. Alfalfa, grass and their ratio come from 2022 harvests only. For each model, number of observations, marginal (fixed effects only) and conditional (random and fixed effects) R^2 , and p-value are shown. NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; sol CP = soluble crude protein; ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber; N = number of observations; D = distance from the tree row; RP = root pruning; SD = sampling date; \times = interaction between independent variables. Dependent variables identified with an asterisk (*) indicate a model in which the block had to be removed from random effects to achieve model convergence.

	Forage yield				Forage nutritive value					
	Yield	Alfalfa	Grass	Grass: Alfalfa	NEL*	CP	sol CP*	ADF*	NDF	uNDF
N	272	128	128	128	96	96	96	96	96	96
Marginal R^2	0.83	0.63	0.37	0.39	0.19	0.34	0.19	0.22	0.25	0.32
Conditional R^2	0.86	0.73	0.48	0.56	0.19	0.38	0.19	0.22	0.25	0.32
D	< 0.001	< 0.001	0.40	0.03	< 0.01	< 0.01	0.44	< 0.01	< 0.01	< 0.01
RP	0.78	0.53	0.81	0.94	0.03	0.38	0.09	0.11	0.07	0.02
SD	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.09	0.23	0.43	0.68	0.92	0.51
% Sand	< 0.001	0.11	0.77	0.49	0.18	0.14	0.96	0.15	0.18	0.52
$D \times RP$	< 0.01	0.13	0.80	0.96	0.04	0.13	0.17	0.06	0.06	0.08
$D \times SD$	< 0.01	0.67	0.30	0.19	0.20	0.15	0.65	0.19	0.15	0.18

Table 4.3 Means (\pm standard error) of forage yield for 2021 and 2022 samplings, and of alfalfa yield and grass yield for 2022 at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control, in 2022. Within a column, different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). Dry forage = total dry forage yield; Alfalfa = dry alfalfa yield; Grass = dry grass yield; Grass:Alfalfa = grasses to alfalfa yield ratio.

Distance from the tree row	Dry forage (g m^{-2})	Alfalfa (g m^{-2})	Grass (g m^{-2})	Grass:Alfalfa (ratio)
4 m	136 \pm 10 a	138 \pm 14 a	36.2 \pm 5.6 a	0.80 \pm 0.34 a
12 m	190 \pm 13 b	219 \pm 17 bc	39.6 \pm 7.6 a	0.31 \pm 0.07 ab
20 m	192 \pm 13 b	207 \pm 20 b	42.8 \pm 8.9 a	0.52 \pm 0.17 ab
Control	216 \pm 15 b	271 \pm 17 c	26.2 \pm 6.4 a	0.16 \pm 0.06 b

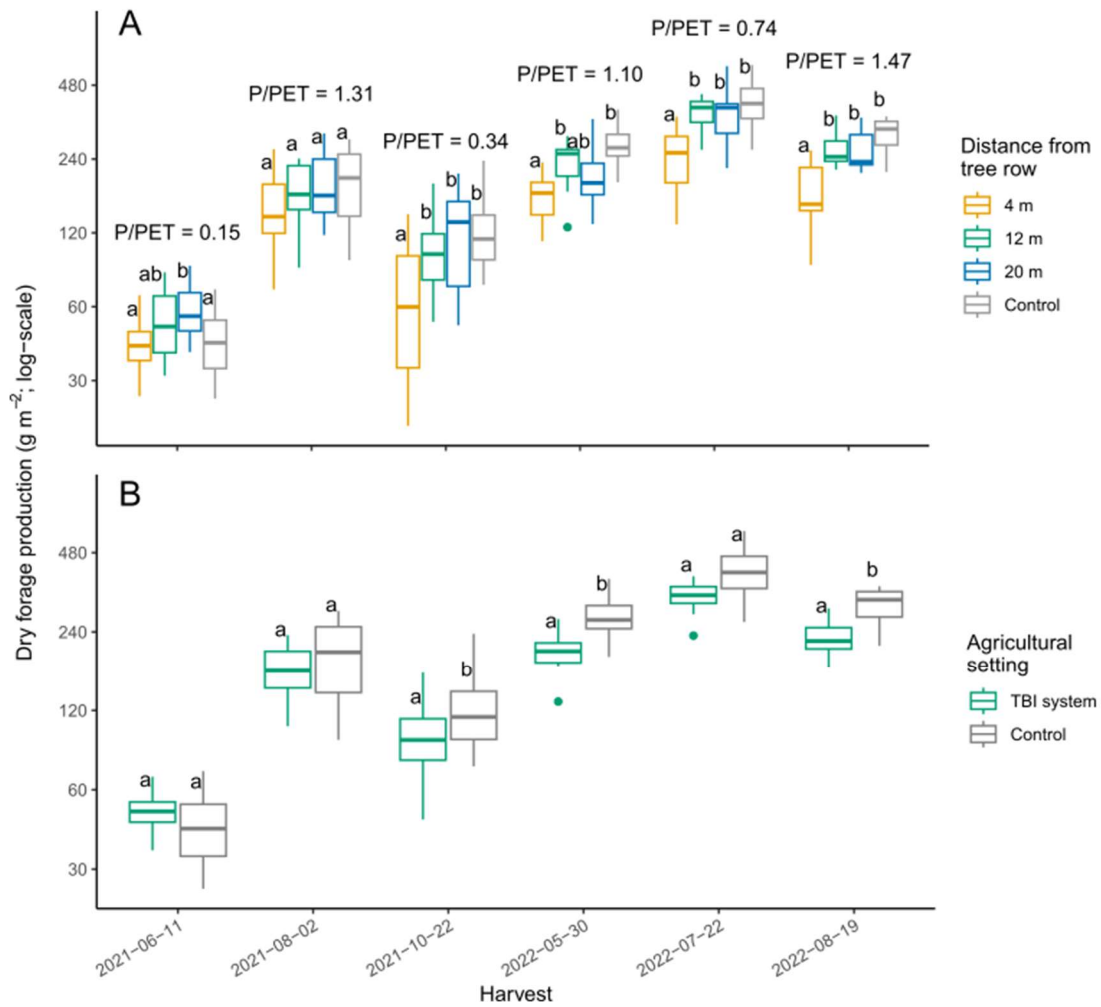


Figure 4.7. Dry forage production at different distances from the tree row (A) and in tree-based intercropping (TBI) system *versus* control (B). Dry forage production is scaled logarithmically along the y-axis. Within each harvest date, different letters represent a significant difference (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). P/PET values represent the conditions over the growing period that are associated with each harvest.

4.6 Forage nutritive value

Distance from the tree row had a significant impact for most of the forage nutritive value attributes (Table 4.2), although few differences were detected among distances (Table 4.4). Crude protein concentration at 12 m was higher than in the control. Acid detergent fiber, neutral detergent fiber, and undigested neutral detergent fiber were generally lower at 12 m compared to 20 m and to the control. In contrast, net energy for lactation at 12 m was often higher than that at 20 m and in the control.

Table 4.4 Means (\pm standard error) of forage nutritive value at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control, in 2022. Within columns, different letters represent a significant difference between means (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber.

Distance	NEL (Mcal kg ⁻¹)	CP (g kg ⁻¹)	ADF (g kg ⁻¹)	NDF (g kg ⁻¹)	uNDF (g kg ⁻¹ NDF)
4 m	1.495 \pm 0.015 a	260.2 \pm 9.7 ab	252 \pm 12 a	295 \pm 15 a	180 \pm 12 a
12 m	1.510 \pm 0.017 a	275.8 \pm 7.3 a	237 \pm 11 a	278 \pm 13 a	170 \pm 10 a
20 m	1.470 \pm 0.015 a	255.4 \pm 7.2 ab	266 \pm 10 a	313 \pm 13 a	196 \pm 12 a
Control	1.470 \pm 0.016 a	253.6 \pm 7.9 b	265 \pm 10 a	309 \pm 13 a	199 \pm 10 a

At 12 m from the tree row, net energy for lactation was significantly higher in pruned plots than in unpruned plots particularly notable at 12 m from the tree line (Table 4.2, Figure S6.4). There was a significant effect of root pruning on undigestible neutral detergent fiber with means of 19.0 \pm 0.7 with root pruning *versus* 18.3 \pm 0.8 without root pruning, especially at 12 m (Figure S6.4).

4.7 Redundancy analysis

Environmental variables explained 20 % ($F_{7,40} = 2.71$, perm = 1000, $p < 0.001$) of the variation in forage yield and quality (Figure 4.8). Only the first axis of the RDA is significant (perm = 1000, $p < 0.01$). Along this first axis, PTLT stood out as the predominant environmental variable that was associated with yield differences, especially with the alfalfa component of forage yield. Sand content, K_{nsat} and soil organic matter had considerable influence on forage yield and quality, each exceeding half of PTLT's relative effect on the first axis of the RDA. Soil bulk density and VWC contributed approximately one-third to PTLT's effect. K_{sat} had a negligible influence on forage yield. Overall, forage yield, grass and alfalfa relative yields, soluble crude protein, and undigestible neutral detergent fiber were closely aligned with the first

axis (Figure 4.8). The remaining forage nutritive value variables showed minimal correlation with RDA1. On one hand, conditions such as higher PTLT, soil bulk density, soil VWC, and soil organic matter, together with conditions of lower proportions of sand and K_{nsat} , were associated with higher forage yield, alfalfa yield, soluble crude protein in forage, and undigestible neutral detergent fiber production. On the other hand, grass yield was enhanced by different environmental conditions.

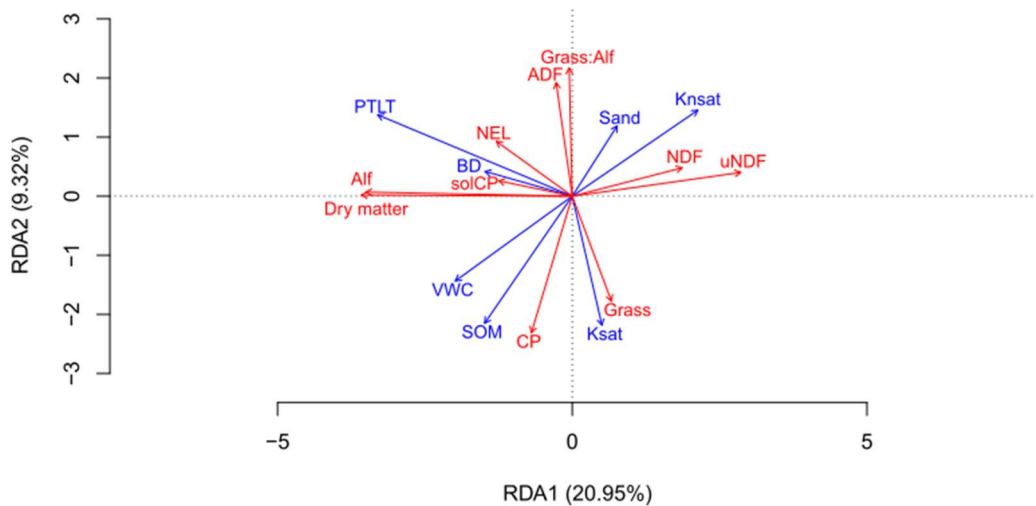


Figure 4.8. Triplot (scaling 2) from the Redundancy Analysis illustrating the relationship between environmental conditions (blue arrows) and forage yield quantity and quality (red arrows) in the 48 subplots located on cultivated land (all subplots, excluding the 0 m distance category). The percentages of variance explained along each axis correspond to their R^2 value. Only the first axis (RDA1) was significant (perm = 1000, $p < 0.01$). Production variables (Yield, Grass, Alf, Grass:Alf) are averaged across all harvests of 2022. Quality variables (NEL, CP, sol CP, ADF, NDF and uNDF) are averaged over the last two harvests of 2022. SOM = soil organic matter; BD = bulk density; K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; K_{nsat} = near-saturated hydraulic conductivity (log transformation); PTLT = Proportion of total light transmittance (logit transformation); VWC = soil volumetric water content averaged over all measurements of 2022; Sand = percentage of sand; Dry matter = total forage production; Alf = total dry matter production of alfalfa; Grass = total dry matter production of forage grasses; Grass:Alf = production ratio of forage grasses to alfalfa; NEL = net energy for lactation; CP = crude protein; solCP = soluble crude protein ADF = acid detergent fiber, NDF = neutral detergent fiber, uNDF = undigestible neutral detergent fiber.

5. DISCUSSION

5.1 Soil hydraulic properties were mainly enhanced beneath the tree row

As hypothesized, the TBI system influenced selected edaphic properties that are important drivers of soil moisture. Yet, this effect was generally limited to the uncultivated strip beneath the tree rows (0 m). For example, K_{sat} was highest and bulk density lowest at this position within the TBI system (Figure 4.1). Such pattern may be due to the increased root density of the trees and the diversified herbaceous vegetation at 0 m. In two temperate TBI systems in France, Battie-Laclau *et al.* (2020) found that fine root length densities of trees and volunteer herbaceous vegetation growing between trees at 0 m were two to three fold higher than those at the tree-crop interface (1 m from the tree row). The positive influence of trees and herbaceous vegetation on water infiltration has been observed in other contexts, especially in agroforestry buffer strips (Anderson *et al.*, 2009 ; Basche & DeLonge, 2019 ; Sahin *et al.*, 2016). We suggest that greater infiltration beneath largely spaced tree rows in TBI systems could potentially reduce runoff generation and erosion risk after heavy rainfall events, while promoting groundwater recharge at the field scale, although further research is needed to quantify how hydrological processes translate into these ecosystem services. In addition, the farm owner had also implemented agro-environmental practices such as no-till direct seeding. Under conventional tillage, the effect of the trees on soil health might have exhibited greater differences within the cultivated alley.

Soil organic matter can have a positive effect on soil water retention (Rawls *et al.*, 2003). We observed increased organic matter accumulation under the tree row (Figure 4.1), which may be due to additional organic inputs from litter, root mortality, rhizodeposition, and from either trees or herbaceous vegetation growing between trees (Cardinael *et al.*, 2018). A previous study within the same experimental TBI system found that tree litter accumulation at 0 m was about seven times greater than that at 12 and 20 m from the tree row (Rivest & Martin-Guay, 2024). Our study took place in a relatively young TBI system (10 years in 2021), which can offer a relatively limited picture of the temporal dynamics of soil hydraulic properties, which are expected to change slowly over time. While litter inputs and the influence of roots from young trees in TBI systems occur mainly within a short radius, the positive effects of trees on soil properties influencing the water supply can extend increasingly further away from the tree rows within the alleyways as trees continue to develop over time (O'Connor *et al.*, 2023 ; Thevathasan *et al.*, 2018).

5.2 Trees reduced potential evaporation and their influence extended to the centre of the alleyways

As hypothesized, the near-centre of the cultivated alleys benefited from reduced potential evaporation under conditions accelerating evaporation (Figure 4.2). As VPD, air temperature and relative humidity within this zone were generally similar to those in the control, we believe that the latter result was likely due to the substantial wind speed reduction combined with the slight reduction in solar radiation. In fact, PTLT near the center of the alleyway (12 and 20 m) was 9.1 % lower than that in the control. Wind speed reduction was the least at 4 m (- 31 %) and the greatest at 12 (- 39 %) and 20 m (- 48 %) from the tree row. Similar wind speed patterns were found in other studies in temperate agroforestry systems (Jacobs *et al.*, 2022), although empirical data from widely spaced TBI systems remain scarce. Kanzler *et al.* (2019) found that short-rotation poplar hedgerows reduced the atmospheric evaporative demand across a 48 m wide alleyway through a reduction in windspeed, VPD and air temperature and relative humidity. They argued that lower wind speeds are more likely to restrict the displacement of water-saturated air with unsaturated air, which is typically conducive to favourable conditions for sustained evaporation when energy and water resources are accessible. Air movement dynamics are important for managing evaporative processes as the deceleration of airflow reduces the rate at which moisture is evaporated (Jose & Holzmueller, 2021). Close to the tree row, we generally observed the greatest windspeeds in alleyways. The rows with high porosity, which are typically found in widely spaced TBI systems with pruned trees, could enhance wind turbulence near trees (Lawson *et al.*, 2019).

5.3 Root pruning rather than the TBI system improved soil water availability

Soil VWC was reduced in proximity to the tree row (0, 4 m), but soil VWC near the centre of the alley (12, 20 m) was comparable to that of the control (Figure 4.6). Near the tree row, evaporation of canopy-intercepted precipitation and transpiration can contribute to reduced soil VWC (Ghazavi *et al.*, 2008). Moreover, greater infiltration rates, as observed within the tree row (Figure 4.1), can reduce water availability in soil surface layers and favour water movement towards deeper soil layers. Overall, increased water uptake by transpiration or reduced water inputs as a result of interception near the trees appear to generally override the microclimatic facilitating effect that is associated with reduced potential evaporation. However, there were two occurrences (out of seven) where the centre of the alleyway was more humid than the control (2022-07-10 and 2022-09-02, Figure 4.6). These sampling dates were associated with the lowest and highest soil VWC values and as such, reduced potential evaporation at the centre of the alleyways may be most effective under extremes of soil humidity. Greater soil VWC in the centre of the alley may be due to prolonged periods of high evaporative demand

on the driest sampling date or due to reduced density of transpiring crop vegetation in the alleyways on the most humid sampling date (Jacobs *et al.*, 2022 ; Robock, 2003).

In the TBI system, the fine root density of trees is generally at its maximum in the uppermost 30 cm soil layer close to the tree row, directly competing with the root system of forage crops (Bouttier *et al.*, 2014 ; Plante *et al.*, 2014). By reducing water uptake from fine tree roots, root pruning can help mitigate the competition for soil water near the tree row. For example, a study on a temperate windbreak during a growing season that was associated with high soil VWC conditions (average of 25 % soil VWC) found that root pruning increased soil VWC close to the tree row (Hou *et al.*, 2003). Consistent with this observation, we found that on average, root pruning increased soil VWC at 4 m from the tree row by more than 20 %. Contrary to our hypothesis, root pruning did not increase soil VWC during drier periods; the positive effects of root pruning were mostly observed under wet soil VWC conditions. The prior response suggests that the forces driving the decrease in soil VWC close to the tree row are dynamic and dependent upon prior climatic conditions. Under dry conditions, reduced soil VWC close to the tree row were comparable in root-pruned and unpruned plots indicating the prevalent influence of the trees on the microclimate (Figure 4.6). For example, higher nighttime temperature near the trees can increase the rate of crop respiration occurring in the absence of light, which in turn consistently reduces soil VWC (Sadok & Jagadish, 2020). Under humid conditions, water uptake by roots from the trees is more likely to have a prevalent influence on soil water availability over TBI-induced microclimatic differences, which may take more time to exert effects on soil VWC.

5.4 Increased yield towards the centre of alleyway during drier periods and increased forage nutritive value could compensate for the yield reduction near trees

As hypothesized, we observed a 30 % yield reduction close to the tree row (4 m; Table 4.3). However, forage nutritive value was not affected by close proximity to the tree row. Close to the tree row, the reduction in total forage yield and alfalfa was primarily due to reduced light availability, as shown by the redundancy analysis (Figure 4.8). While Pang *et al.* (2019) observed a slight yield increase as a result of a 45 % reduction in total light transmission in a shade-cloth experiment, we found that reduced light availability was associated with a reduction in forage yield. The difference regarding the effect of light intensity on yield between the results of Pang *et al.* (2019) and our own can be explained by difference regarding shading apparatus. First, the canopy architecture of the uncultivated strips in the TBI system generated a temporally varying light environment, while shade created by cloth-shade experiment was

relatively constant. For example, PAR was reduced by 65 % during the 13th hour of the day (Figure 4.4), theoretically resulting in direct yield loss for C3 crops. For most of the sunlit hours of the day, shading was under the 50 % total light transmittance productivity plateau (Jose *et al.*, 2004 ; Reynolds *et al.*, 2007). Secondly, the dynamic co-limitation of light and water availability by trees may also explain the slight yield reduction observed. Even though the RDA did not identify soil water availability as having a prevalent influence on total yield, results from the pruning treatment are indicative of water and light co-limitation near the tree row, with a 20 % yield increase at 4 m from the tree row in pruned plots. Furthermore, the diurnal pattern of temperature at this distance may have affected the grass to alfalfa ratio as well as the total yield. During the daytime, shade and wind turbulence at this distance as well as a decrease in air temperature at 4 m from the tree row may help to counteract yield reduction of our cool-season forage grasses during the hot summer months (Putnam & Orloff, 2014). This is in accordance with our results, since this is the distance at which forage grasses had yields comparable to that of alfalfa. In the nighttime, higher ambient temperatures are known to increase dark respiration, thereby having the potential to reduce biomass accumulation (Coast *et al.*, 2019 ; Lawson *et al.*, 2019).

Towards the centre of the alleyways (12 and 20 m), the hypothesis of yield increases in the TBI system that was intensified by drier conditions was partially confirmed. Generally, yield was lower towards the in the TBI system than in the control. While we did not observe a systematic yield increase in the TBI system under drier conditions, there were few observations supporting our hypothesis. First, the reduction of yield in the TBI system typically occurred for periods when water resources were abundant ($P/PET > 1$), while yields in the TBI system and the control were comparable for the driest harvest ($P/PET = 0.15$; Figure 4.7B). This harvest needs to be evaluated with caution as it the first after crop establishment, usually to prevent weeds from seeding. Although, this result is consistent with Nasielski *et al.* (2015), who recorded a reduced yield gap between a soybean TBI system and controls for drier periods. However, in our study, the reduced gap was not caused by a stabilizing effect of the TBI system on soil water availability, but rather by a compensatory yield increase towards the centre of the alleyways (Figure 4.7A). Leading us to the second point, we observed an increase in yield for the centre of the TBI system under the two most water deficient periods ($P/PET = 0.15$ and 0.34 ; Figure 4.7A). In drier periods, the conditions at the centre of the alleyways may help protect yield against extreme VPD, as observed during drought events (Amitrano *et al.*, 2019 ; Kanzler *et al.*, 2019 ; Rigden *et al.*, 2020). Finally, forage grass yield may be more sensitive to the microclimate mitigation brought about by a TBI system than alfalfa. In the first harvest after crop establishment (2021-06-11), we observed an overall

yield distance-specific pattern that was comparable to that of the high potential evaporation (Figure 4.2 and 4.7A). Some of the forage grasses, i.e. timothy, develop early in the growing season, leading to reduced competition for resources, given that alfalfa remains underdeveloped (Putnam & Orloff, 2014). As productivity of forage grasses is known to be highly sensitive to soil water availability, the microclimate-mitigating effect of the TBI system may have the potential to benefit for cool-season forage grass productivity (Gelley *et al.*, 2020 ; Staniak & Kocoń, 2015).

The overall conditions of the TBI system tend to increase crude protein concentration of forage (Table 4.4). As an increase in shade generally increases crude protein in forage grasses (Lin *et al.*, 2001), prevalence of forage grasses and shading may then explain why we did not detect a decrease in forage nutritive value at 4 m from the tree row. A reduction in temperature and VPD was observed at 12 m from the tree row, a distance at which we found maximal crude protein content (Table 4.4). Surprisingly, root pruning influenced forage nutritive value at 12 m from the tree row, where roots may be present but light reduction is only mild. In TBI systems, tree roots have not been documented to extend beyond 9 m from the tree row, but at this distance, fine roots of hybrid poplar has been observed in superficial layers of the soil (Plante *et al.*, 2014). In unpruned plots, we observed a reduction in undigested NDF and an increase in net energy for lactation, suggesting that mild root competition from the trees may enhance forage nutritive value when light is only slightly limited. In other words, root pruning might have a stabilizing effect on the variation of the forage nutritive value across distances in TBI system (Figure S6.4).

5.5 Concluding remarks

It is difficult to assess the effect of root pruning on soil properties and yield. In a system that can take decades to reach equilibrium, a study over two years should be interpreted with caution, especially for soil properties that change slowly. Results from the RDA that show an increase in soil organic matter and a decrease in K_{nsat} can be tied back not only to an increase in alfalfa production, but also to a decrease in forage grass production. We may expect more of these interactions as the TBI system develops and shapes edaphic properties.

This study has prompted multiple considerations for future TBI-related research. First, soil texture proved to have a significant influence on most of the studied soil properties, as well as on potential evaporation and yield. This underlines the importance of considering soil texture in models, given the

broad spatial variability in the property over large agroforestry systems. Second, when assessing yield, soil water content and microclimatic variables, it is essential to take into account time-dependent scales. Such variables vary greatly under different climatic conditions, along the growth dynamics of the crops and the evolving seasonal properties of the trees and undergrowth. Third, because of the spatially extended effect of tree rows on microclimatic conditions, wind reduction that is incurred by trees may have affected our control plots (Figure S6.1). As a consequence, contrasts with the TBI system effects on microclimate variables may have been underestimated. Nevertheless, our results indicate that windspeed behaviour in the controls was significantly different from that recorded towards the centre of the TBI system. This suggests that we can consider the inclusion of controls in a TBI system if they are located at a distance equivalent to at least twice the height of the trees (*i.e.*, the fetch length); the average height of the poplar was around 16 m and our controls were established at least 40 m away from the tree line.

6. CONCLUSION

En climat tempéré, les effets des SAI sur les conditions microclimatiques et les flux hydrologiques ont été peu étudiés. Généralement, nous avons observé que ce type de système engendre des rendements plus faibles que ceux des parcelles dépourvues d'arbres. Cependant, le SAI a le potentiel d'influencer positivement la productivité fourragère lors de conditions climatiques extrêmes, lesquelles sont appelées à augmenter dans le futur. Nos résultats couvrant deux saisons de croissance indiquent qu'une augmentation du rendement proche du centre des allées cultivées peut survenir pendant les périodes plus sèches. Nos résultats indiquent aussi que le SAI peut améliorer certaines variables associées à la qualité fourragère comme la teneur en protéines brutes. En situation d'excédant hydrique, proche des arbres, le SAI a réduit la disponibilité en eau du sol en comparaison à un témoin agricole. À l'exception de cette courte zone à l'interface arbre-culture, nous avons toutefois montré que le SAI a le potentiel d'augmenter la disponibilité de l'eau dans des conditions extrêmes, aussi bien humides que sèches. La demande évaporative atmosphérique était réduite près du centre des allées dans des conditions de forte évaporation potentielle. De plus, nos résultats illustrent un effet positif marqué de la bande non-cultivée du SAI (végétation herbacée et arbres) sur l'accumulation de la matière organique du sol, une propriété édaphique importante à la rétention de l'eau du sol. Cette accumulation de matière organique devrait s'étendre de la rangée d'arbres vers le centre des allées cultivées, à mesure que le système TBI évolue dans le temps. Près de la rangée d'arbres, la réduction du rendement due à la co-limitation de la lumière et de l'eau du sol s'est traduit par une abondance et un rendement des graminées fourragères plus importants que ceux de la luzerne.

Nos résultats démontrent que les rangées d'arbres constituant un SAI peuvent entraîner d'autres bénéfices. Par exemple, la diminution de la densité apparente du sol et l'augmentation du taux d'infiltration à saturation sous la rangée d'arbres suggèrent une certaine capacité des SAI à absorber les événements de pluie intenses. Tel un avaloir, la rangée d'arbres peut permettre d'évacuer rapidement le surplus d'eau, ce qui peut permettre un passage plus rapide de la machinerie au printemps et une réduction du risque de compaction du sol à l'automne. En situation de pente forte, la rangée d'arbres pourrait aussi réduire le ruissellement de surface et l'érosion du sol.

Proche de la rangée d'arbres, la culture de plantes fourragères graminées tolérantes à l'ombrage et préférant des températures fraîches serait une avenue à considérer pour maintenir des rendements

satisfaisants et substituer le cernage racinaire. Les conclusions concernant les impacts du cernage racinaire sur les propriétés du sol dans les allées cultivées restent peu évidentes. Bien que cette opération ait atténué la diminution de la disponibilité de l'eau en conditions normales à humides et ait eu un effet généralement positif sur la productivité des cultures proche de la rangée d'arbre, les résultats de notre étude indiquent que son effet sur la teneur en eau du sol devient marginal lors de périodes plus sèches. Par ailleurs, les résultats d'une autre étude réalisée sur le même site expérimental que celui de notre étude ont montré un effet négatif du cernage sur le rendement d'une culture de soya pendant deux années consécutives (Gagné *et al.*, 2022). De plus, nous avons observé que le traitement de cernage racinaire peut favoriser la production de rejets de peupliers à partir des racines coupées, autant dans la bande non cultivée que proche des rangées dans la zone cultivée. Nos observations suggèrent donc que le cernage racinaire est une pratique agroforestière qu'il faut prudemment envisager dans tout système agroforestier (incluant les haies agroforestières) composé d'espèces ligneuses qui peuvent facilement rejeter (p. ex. peupliers et saules).

Dans le cadre de futures recherches, nous recommandons un affinement du réglage spatio-temporel pour comprendre la dynamique microclimatique des SAI. Étant donné la haute variabilité temporelle de l'effet du SAI sur le microclimat, des analyses sur des journées « modèles » permettraient de mieux définir les interactions entre les conditions microclimatiques et la productivité agricole. De plus, la maîtrise de la concurrence racinaire des arbres (p. ex. par cernage racinaire) demeure une approche expérimentale intéressante pour étudier d'autres processus hydrologiques en SAI comme l'évaluation de la possible redistribution hydraulique par les racines des arbres. Dans les périodes les plus arides, nous avons observé de plus forts rendements dans les parcelles non-cernées que cernées, ce qui pouvait être en partie attribuable au phénomène de redistribution hydraulique. En raison du nombre restreint d'observations, nous n'avons toutefois pas la puissance statistique pour évaluer la triple interaction décrivant l'effet du cernage pour différentes conditions de croissance en fonction de la distance à la rangée d'arbres (Récolte × Distance × Cernage racinaire).

ANNEXE A

Overview of experimental site

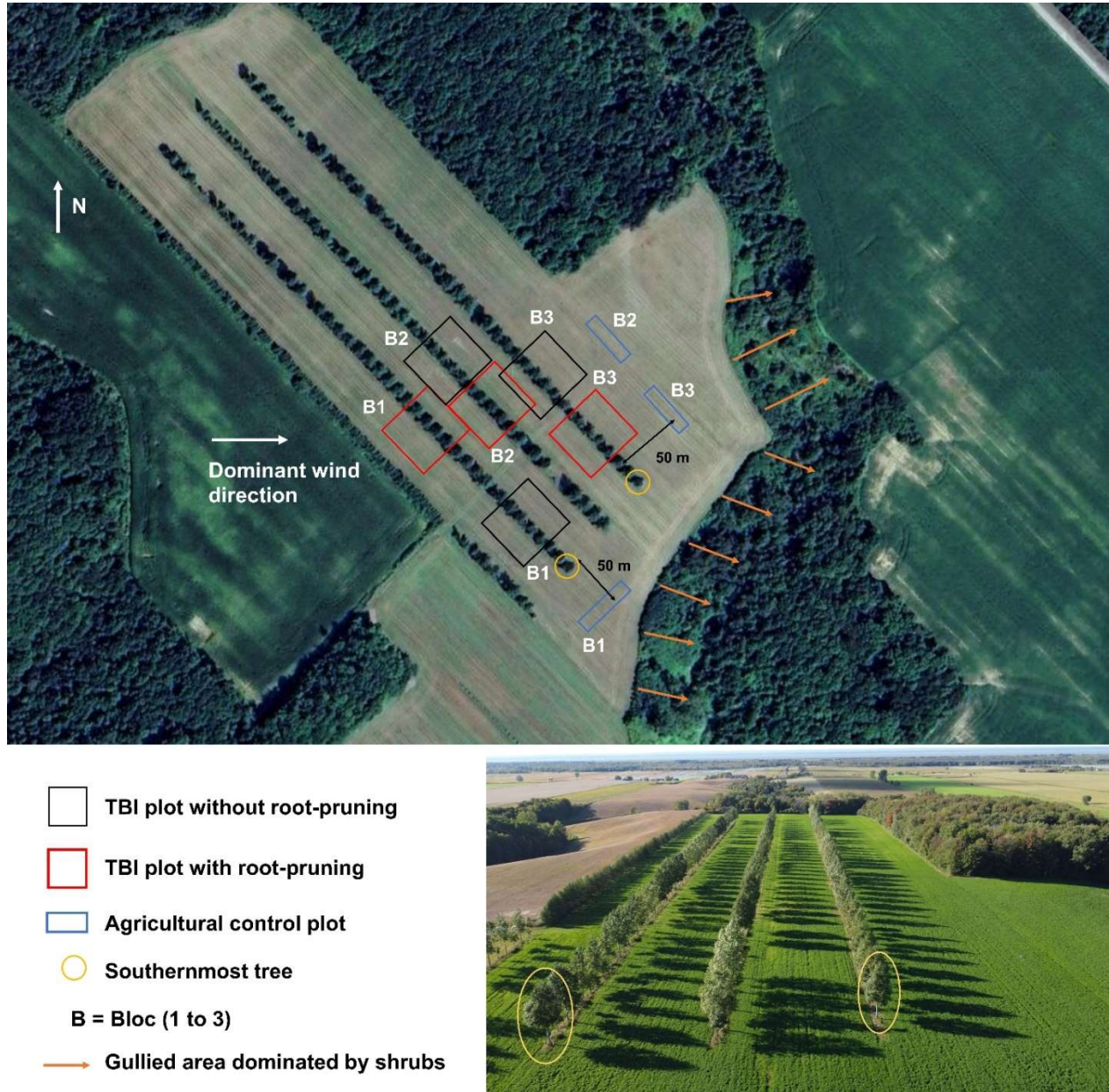


Figure S6.1 Experimental layout showing the locations of each plot within the three blocks. The photo (courtesy of CRAAQ) was taken in September 2022 near 19:00.

ANNEXE B

Forage growth periods for each harvest

Table S6.1 Precisions on harvest growth periods for estimation of precipitation to potential evaporation ratio. For each harvest, the beginning and end dates of the forage growth period are provided. Numbers of days not estimated from the in-site meteorological stations located in the controls were estimated from a nearby weather station (Nicolet weather station, 46°13'N 72°39'W, Government of Canada, 2023) to estimate the precipitation to potential evaporation ratio.

<i>Harvest date</i>	<i>Forage growth period (number of cumulative days)</i>	<i>T and RH estimated from Nicolet station</i>	<i>Precipitation estimated from Nicolet station</i>	<i>P/PET index</i>
2021-06-11	2021/05/22 – 2021/06/11 (20 days)	All	All	0.15
2021-08-02	2021/06/20 – 2021/08/02 (43 days)	2021/06/20 – 2021/06/24		1.31
2021-10-22	2021/08/05 – 2021/10/22 (78 days)	2021/08/05 – 2021/09/09	2021/09/22 – 2021/09/30	0.35
2022-05-30	2022/05/10 – 2022/05/30 (20 days)	2022/05/10 – 2022/05/12	2022/05/10 – 2022/05/12	1.10
2022-07-22	2022/06/22 – 2022/07/22 (30 days)	2022/06/22 – 2022/06/27		0.74
2022-08-19	2022/07/25 – 2022/08/19 (25 days)	2022/07/25 – 2022/07/29		1.47

T = temperature; RH = relative humidity; P = precipitation; PET = potential evaporation

ANNEXE C

Piecewise structural equation models of K_{nsat} and K_{sat}

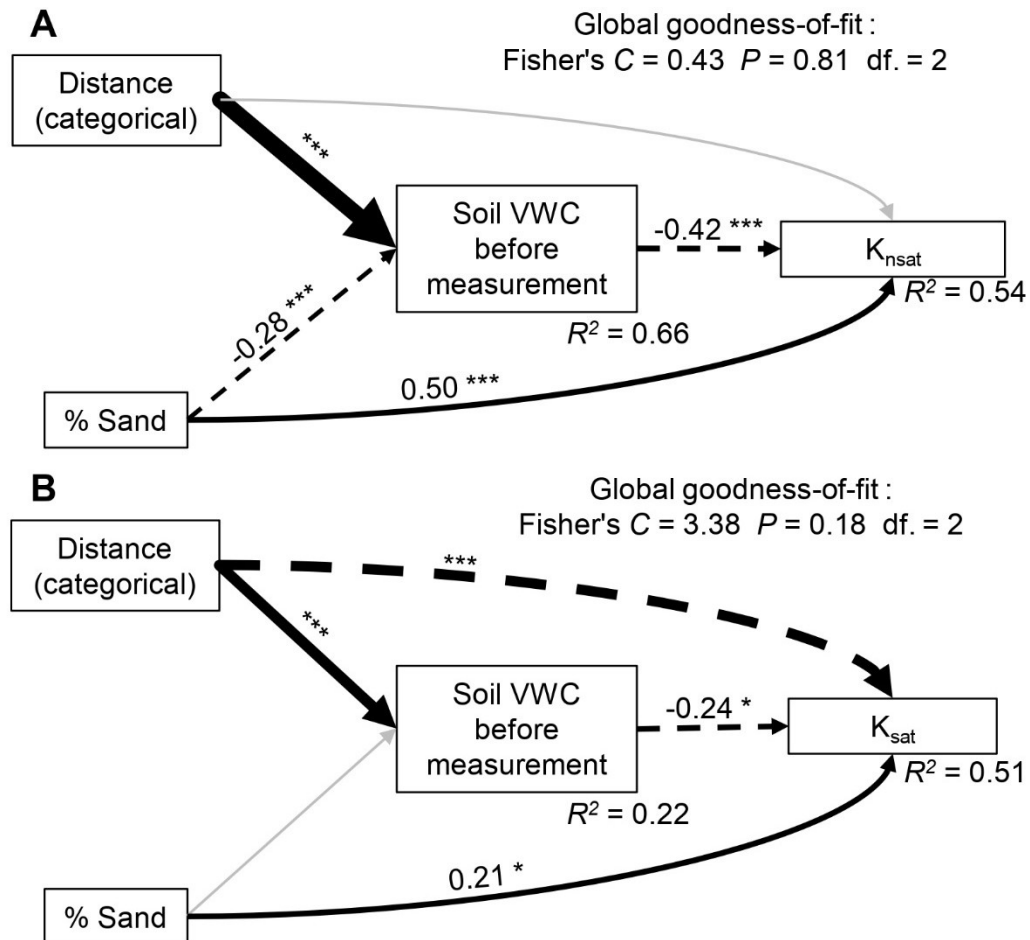


Figure S6.2 Comparison between direct effects of distance to the tree row on A) near-saturated state infiltration rate (K_{nsat}) and B) saturated hydraulic conductivity (K_{sat}); and indirect effects through soil volumetric water content (VWC) measured just before taking infiltration measurements. Piecewise structural equation models (SEM) were done using package *piecewiseSEM* in R (Lefcheck, 2016). Given that we were only interested in the comparison of direct and indirect effects of trees, the *a priori* models contained only the significant variables influencing both infiltration variables (*i.e.*, excluding root pruning; see Table 4.1). SEMs included random effects as in Eqn. 5. Non-significant links were removed (grey arrows). Global goodness-of-fit shows that we cannot reject these models. Arrow sizes represent the importance of each link based upon standardized coefficients (dashed when negative), except for distance importance, which was based upon the proportion of variance explained by distance alone (*e.g.*, the reduction in marginal R^2 when removing "VWC ~ Distance") compared to each of the other variables. Marginal R^2 -values are shown. * $p < 0.05$; *** $p < 0.001$.

Formula for arrow size

- $1 + (10 * |\text{standardized coefficient}|) / 4$
- Example in A of arrow size for distance, given there is no coefficient:
 - 53 % of marginal R^2 for VWC attributed to Dist (diminution of R^2 when removing VWC ~ Dist)
 - 7 % attributed to sand
 - Approximate coefficient = $53/7 * 0.28 = 2.12$
 - Use the coefficient in the equation above
- Arrow size of “VWC ~ Dist” is different in B since there is no comparison to another coefficient:
 - 21 % of marginal R^2 for IS attributed to Dist
 - 22 % of marginal R^2 for VWC explained only by Dist
 - Arrow size = $22/21 * \text{arrow size for IS} \sim \text{Dist}$

ANNEXE D

Group formation for potential evaporation sampling dates

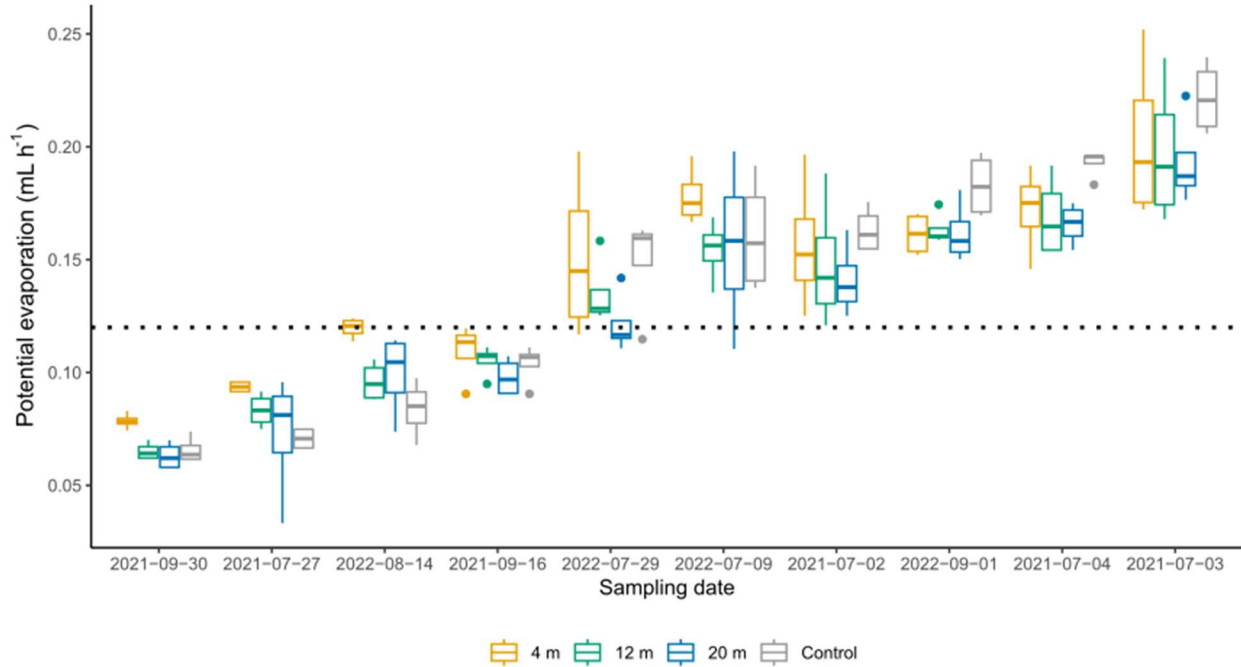


Figure S6.3. Piché evaporation at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control at each sampling date. The threshold-value of 12 mL h⁻¹ (dotted line) was set to separate the sampling dates of high and low potential evaporation. Under the threshold-value, controls were more likely to have reduced evaporative demand compared to the centre of the TBI system. Above the threshold-value, controls tended to have higher evaporative demand than at the centre of TBI, while potential evaporation was consistently lower nearer to the trees and continuously increased as the middle of the cultivated alley was approached (4 m < 12 m < 20 m).

ANNEXE E

Effect of root pruning at different distances from the tree row on forage nutritive value

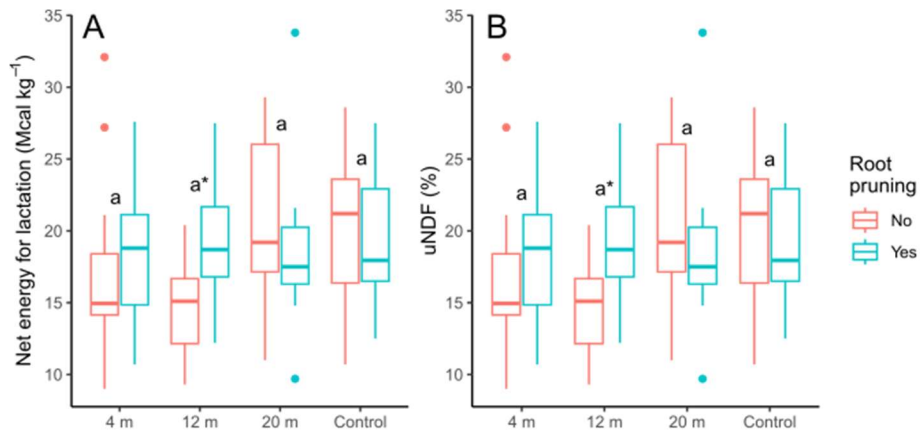


Figure S6.4 Net energy for lactation (A) and undigested NDF (B) after 240 hours at different distances (4, 12, 20 m) from the tree row in the tree-based intercropping system and in the control. Root pruning is identified (pruned distances in red, unpruned in blue). Different letters represent a significant difference among distances categories, while an asterisk represents a significant difference between the pruning categories of the corresponding distance (Tukey HSD for multiple comparisons, $p < 0.05$). uNDF = undigestible neutral detergent fiber.

APPENDICE A

Résolution et précisions des appareils mesurant les variables environnementales

TECHNOLOGIE	RÉSOLUTION DE L'APPAREIL	PRÉCISION DE LA MESURE
FIELD SCOUT TDR 350	0,1 % du contenu volumétrique en eau	± 3,0 % VWC
DATA LOGGER HOBO MX2301A	0.04°C de la température de l'air	±0.2°C
	0.01 % de l'humidité relative de l'air	± 3 % RH
STATIONS MÉTÉOS DE WATCHDOG SPECTRUM TECHNOLOGIES	0 à 2500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ du rayonnement	± 5 % PAR
	0,1 % du contenu volumétrique en eau	± 3,0 % VWC
	0,1 °C pour la température du sol	± 0,8 °C
PLUVIOMÈTRE RAINLOGGER	Jauge activée après avoir accumulées 0,25 mm de pluie	

APPENDICE B
Caractéristiques du site expérimental

Sol	Loam sableux
pH	6,4
Aire du site	11 ha
Densité d'arbres	50 arbres ha ⁻¹
Orientation des rangées d'arbres	Nord-ouest – Sud-est
Nombre de rangée d'arbres	4 rangées
Longueur des rangées	400 m
Espaces entre les rangées d'arbres	40 m
Espaces entre les arbres dans les rangées	5 m
Composition d'arbres	Peuplier hybride (<i>Populus deltoides</i> × <i>nigra</i>) en alternance avec plusieurs essences de feuillus nobles
Précédents culturaux	Soya (2016-17-18) Maïs (2019) Seigle (2020)
Travail du sol 2021	Semis-direct
Culture pour 2021	Culture fourragère
Travail du sol 2022	Aucun
Culture pour 2022	Culture fourragère

RÉFÉRENCES

- Amitrano, C., Arena, C., Rouphael, Y., De Pascale, S. et De Micco, V. (2019). Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments. *Annals of Applied Biology*, 175(3), 313-325. <https://doi.org/10.1111/aab.12544>
- An, N., Tang, C.-S., Xu, S.-K., Gong, X.-P., Shi, B. et Inyang, H.I. (2018). Effects of soil characteristics on moisture evaporation. *Engineering Geology*, 239, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.028>
- Anderson, S.H., Udawatta, R.P., Seobi, T. et Garrett, H.E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5-16. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>
- Anel, B., Cogliastro, A., Olivier, A. et Rivest, D. (2017). *Une agroforesterie pour le Québec. Document de réflexion et d'orientation*. Comité agroforesterie, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- Angadi, S.V., Umesh, M.R., Begna, S. et Gowda, P. (2022). Light interception, agronomic performance, and nutritive quality of annual forage legumes as affected by shade. *Field Crops Research*, 275, 108358. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108358>
- Anower, M.R., Boe, A., Auger, D., Mott, I.W., Peel, M.D., Xu, L., Kanchupati, P. et Wu, Y. (2017). Comparative drought response in eleven diverse alfalfa accessions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(1), 1-13. <https://doi.org/10.1111/jac.12156>
- Arenas-Corraliza, M.G., López-Díaz, M.L. et Moreno, G. (2018). Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 264, 111-118. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2018.05.024>
- Baker, T.P., Moroni, M.T., Hunt, M.A., Worledge, D. et Mendham, D.S. (2021). Temporal, environmental and spatial changes in the effect of windbreaks on pasture microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297, 108265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108265>
- Basche, A.D. et DeLonge, M.S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS One*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Basche, A. et DeLonge, M. (2017). The impact of continuous living cover on soil hydrologic properties: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1179-1190. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0077>
- Battie-Laclau, P., Taschen, E., Plassard, C., Dezette, D., Abadie, J., Arnal, D., Benezech, P., Duthoit, M., Pablo, A. L., Jourdan, C., Laclau, J. P., Bertrand, I., Taudière, A. et Hinsinger, P. (2020). Role of trees and herbaceous vegetation beneath trees in maintaining arbuscular mycorrhizal communities in temperate alley cropping systems. *Plant and Soil*, 453(1-2), 153-171. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04181-z>

- Bayala, J. et Prieto, I. (2020). Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, 453(1-2), 17-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>
- Bélanger, G., Tremblay, G.F., Seguin, P., Lajeunesse, J., Bittman, S. et Hunt, D. (2020). Cutting management of alfalfa-based mixtures in contrasting agroclimatic regions. *Agronomy Journal*, 112(2), 1160-1175. <https://doi.org/10.1002/agj2.20142>
- Bouttier, L., Paquette, A., Messier, C., Rivest, D., Olivier, A. et Cogliastro, A. (2014). Vertical root separation and light interception in a temperate tree-based intercropping system of Eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 88(4), 693-706. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9721-6>
- Brandle, J.R., Takle, E. et Zhou, X. (2022). Windbreak practices. Dans H.E. Garrett, S. Jose et M. Gold (dir.), *North American Agroforestry* (Chapter 5, p. 91-126). John Wiley & Sons, Ltd.
- Brooks, M.E., Kristensen, K., van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C., Nielsen, A., Skaug, H.J., Maechler, M. et Bolker, B.M. (2017). glmmTMB - Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2), 378-400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Campi, P., Palumbo, A.D. et Mastrorilli, M. (2009). Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.10.004>
- Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T. et Chenu, C. (2018). High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system -- combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15(1), 297-317. <https://doi.org/10.5194/bg-15-297-2018>
- Carrier, M., Rhéaume Gonzalez, F.A., Cogliastro, A., Olivier, A., Vanasse, A. et Rivest, D. (2019). Light availability, weed cover and crop yields in second generation of temperate tree-based intercropping systems. *Field Crops Research*, 239, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.004>
- Casler, M.D., Kallenbach, R.L. et Brink, G.E. (2020). Cool-Season Grasses for Humid Areas. Dans K.J. Moore, M. Collins, C.J. Nelson et D.D. Redfearn (dir.), *Forages* (1^{re} éd., p. 297-311). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch16>
- Castillo, M.S., Tiezzi, F. et Franzluebbers, A.J. (2020). Tree species effects on understory forage productivity and microclimate in a silvopasture of the Southeastern USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 295, 106917. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106917>
- Catunda, K.L.M., Churchill, A.C., Zhang, H., Power, S.A. et Moore, B.D. (2022). Short-term drought is a stronger driver of plant morphology and nutritional composition than warming in two common pasture species. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(6), 841-852. <https://doi.org/10.1111/jac.12531>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2017, 23 janvier). Détermination des solides totaux et des solides totaux volatils : méthode gravimétrique.

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec. (2003, 27 mars). Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte au feu (PAF).

Coast, O., Shah, S., Ivakov, A., Gaju, O., Wilson, P.B., Posch, B.C., Bryant, C.J., Negrini, A.C.A., Evans, J.R., Condon, A.G., Silva-Pérez, V., Reynolds, M.P., Pogson, B.J., Millar, A.H., Furbank, R.T. et Atkin, O.K. (2019). Predicting dark respiration rates of wheat leaves from hyperspectral reflectance. *Plant, Cell & Environment*, 42(7), 2133-2150. <https://doi.org/10.1111/pce.13544>

Cook, B.I., Mankin, J.S. et Anchukaitis, K.J. (2018). Climate change and drought: from past to future. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 164-179. <https://doi.org/10.1007/S40641-018-0093-2>

Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>

Dardonville, M., Urruty, N., Bockstaller, C. et Therond, O. (2020). Influence of diversity and intensification level on vulnerability, resilience and robustness of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 184, 102913. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102913>

Decagon Devices Inc. (2011). Mini Disk Infiltrometer - User's Manual - Version 9 (Pullman, WA, USA), 28.

Del Pozo, A., Ovalle, C., Espinoza, S., Barahona, V., Gerding, M. et Humphries, A. (2017). Water relations and use-efficiency, plant survival and productivity of nine alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars in dryland Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 84, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.002>

De Wrachien, D. et Goli, M.B. (2015). Global warming effects on irrigation development and crop production: A world-wide view. *Agricultural Sciences*, 06(07), 734-747. <https://doi.org/10.4236/as.2015.67071>

Dingman, L. S. (2002). *Physical hydrology* (Second Edition). Waveland Press, Inc., Long Grove, IL.

Doyle, H. (2023). *Intercropping alfalfa with select grass species for increased yield and quality under deficit irrigation* [Master's Thesis, Colorado State University, Ft. Collins, CO].

Ehret, M., Graß, R. et Wachendorf, M. (2015). The effect of shade and shade material on white clover / perennial ryegrass mixtures for temperate agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 89, 557-570. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9791-0>

FAO, FIDA, OMS, PAM et UNICEF. (2021). *Résumé de L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2021. Transformer les systèmes alimentaires pour que la sécurité alimentaire, une meilleure nutrition et une alimentation saine et abordable soient une réalité pour tous.* <https://doi.org/10.4060/cb5409fr>

Fox, J. et Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression. Third Edition.* Sage, Thousand Oaks, CA. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>

Frazer, G.W., Canham, C.D. et Lertzman, K.P. (1999). Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye

photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, B.C., and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, N.Y.

- Gagné, G., Lorenzetti, F., Cogliastro, A. et Rivest, D. (2022). Soybean performance under moisture limitation in a temperate tree-based intercropping system. *Agricultural Systems*, 201, 103460.
- Gates, R.S., Zolnier, S. et Buxton, J. (1998). Vapor Pressure Deficit Control Strategies for Plant Production. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(12), 271-276. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36076-7](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36076-7)
- Gelley, C.H., Ashworth, A.J., Keyser, P.D., Nave, R.L.G. et Rhinehart, J.D. (2020). Water-Use Efficiency of Forage Crops in the Southeastern United States. *Agronomy*, 10(9), 1377. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091377>
- Ghazavi, G., Thomas, Z., Hamon, Y., Marie, J.C., Corson, M. et Merot, P. (2008). Hedgerow impacts on soil-water due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes*, (22), 4723-4735. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Government of Canada. (2023). *Historical Climate Data*. https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html accessed on 2023-10-13.
- He, C., Zhao, Y., Wang, Y., Cai, J., Gao, J. et Zhang, J. (2022). Forage quality and physiological performance of mowed alfalfa (*Medicago sativa* L.) subjected to combined light quality and drought. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1047294. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1047294>
- Hernández-Morcillo, M., Burgess, P., Mirck, J., Pantera, A. et Plieninger, T. (2018). Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science & Policy*, 80, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.013>
- Hillel, D. (2003). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X> accessed on 2021-10-16.
- Holden, J., Grayson, R.P., Berdeni, D., Bird, S., Chapman, P.J., Edmondson, J.L., Firbank, L.G., Helgason, T., Hodson, M.E., Hunt, S.F.P., Jones, D.T., Lappage, M.G., Marshall-Harries, E., Nelson, M., Prendergast-Miller, M., Shaw, H., Wade, R.N. et Leake, J.R. (2019). The role of hedgerows in soil functioning within agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 273, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.027>
- Hothorn, T., Bretz, F. et Westfall, P. (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346–363.
- Hou, Q., Brandle, J., Hubbard, K., Schoeneberger, M. et Francis, C. (2003). Alteration of soil water content consequent to root-pruning at a windbreak/crop interface in Nebraska, USA. *Agroforestry Systems*, 57, 137-148.
- Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. et Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 104(50), 19691-19696. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>

- Hsiao, J., Swann, A.L.S. et Kim, S.-H. (2019). Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107692. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107692>
- Inurreta-Aguirre, H.D., Lauri, P.-É., Dupraz, C. et Gosme, M. (2022). Impact of shade and tree root pruning on soil water content and crop yield of winter cereals in a Mediterranean alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 96, 747-757. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00736-9>
- Jacobs, S.R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Schwartz, C., Breuer, L. et Bellingrath-Kimura, S.D. (2022). Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
- Jafarian, S., Chaichi, M.R. et Moradi-ghahderijani, M. (2016). Effects of surfactant and limited irrigation on forage yield and quality of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 10(1), 76-80.
- Jose, S., Gillespie, A.R. et Pallardy, S.G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61-62(1-3), 237-255. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9B>
- Jose, S. et Holzmueller, E.J. (2021). Tree–Crop Interactions in Temperate Agroforestry. Dans H.E. Garrett, S. Jose et M.A. Gold (dir.), *ASA, CSSA, and SSSA Books* (1^{re} éd., p. 67-87). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780891183785.ch4>
- Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D. et Veste, M. (2019). Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1821-1841. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>
- Kørup, K., Lærke, P.E., Baadsgaard, H., Andersen, M.N., Kristensen, K., Münnich, C., Didion, T., Jensen, E. S., Mårtensson, L. et Jørgensen, U. (2018). Biomass production and water use efficiency in perennial grasses during and after drought stress. *GCB Bioenergy*, 10(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12464>
- Lagacé, R. (2016). *Chapitre 2 - Relations eau-sol-plante* [Notes de cours et illustrations]. Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation.
- Laplante, L. et Choinière, L. (1954). *Étude pédologique des sols du comté d'Yamaska* [Carte]. <https://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pq59/index.html>
- Laroche, G., Domon, G. et Olivier, A. (2020). Exploring the social coherence of rural landscapes featuring agroforestry intercropping systems using locals' visual assessments and perceptions. *Sustainability Science*, 15(5), 1337-1355. <https://doi.org/10.1007/S11625-020-00837-3>
- Lauzon, J., Tremblay, G.F., Bélanger, G., Seguin, P., Lajeunesse, J. et Gervais, R. (2019). Alfalfa and timothy nutritive value in contrasting agroclimatic regions. *Agronomy Journal*, 111(3), 1371-1380. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0634>

- Lawson, G., Dupraz, C. et Watté, J. (2019). Can Silvoarable Systems Maintain Yield, Resilience, and Diversity in the Face of Changing Environments? Dans *Agroecosystem Diversity* (p. 145-168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00009-1>
- Lefcheck, J.S. (2016). piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5), 573-579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Lenth, R. V. (2023) emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans> 2023.
- Lesk, C., Rowhani, P. et Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Lin, C.H., McGraw, R. L., George, M.F. et Garrett, H.E. (1998). Shade effects on forage crops with potential in temperate agroforestry practices. *Agroforestry Systems*, 44(2), 109-119. <https://doi.org/10.1023/A:1006205116354>
- Lin, C.-H., McGraw, M., George, M. et Garrett, H.E. (2001). Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. *Agroforestry Systems*, 53, 269-281. <https://doi.org/10.1023/A:1013323409839>
- Lorenz, K. et Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443-454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S. D. et Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 43-62. <https://doi.org/10.1051/AGRO:2007057>
- MAPAQ. (2018). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des plantes fourragères au Québec*. Gouvernement du Québec.
- Markwitz, C., Knohl, A. et Siebicke, L. (2020). Evapotranspiration over agroforestry sites in Germany. *Biogeosciences*, 17(20), 5183-5208. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5183-2020>
- Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M. et Capowiez, Y. (2020). How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. *Plant and Soil*, 453(1-2), 29-44. <https://doi.org/10.1007/S11104-019-04322-4>
- Miller, A.W. et Pallardy, S.G. (2001). Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems*, 53(3), 247-259. <https://doi.org/10.1023/A:1013327510748>
- Nasielski, J., Furze, J.R., Tan, J., Bargaz, A., Thevathasan, N.V. et Isaac, M.E. (2015). Agroforestry promotes soybean yield stability and N²-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1541-1549. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0330-1>

- O'Connor, C., Zeller, B., Choma, C., Delbende, F., Siah, A., Waterlot, C. et Andrianarisoa, K.S. (2023). Trees in temperate alley-cropping systems develop deep fine roots 5 years after plantation: What are the consequences on soil resources? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 345, 108339. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108339>
- Oksanen, J., Simpson, G.L., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., ... Weedon, J. (2022). vegan: Community Ecology Package. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Ouranos. (2015a). *Vers l'adaptation - Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015*, 114.
- Ouranos. (2015b). *Vers l'adaptation - Synthèses des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 2 : Vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques*, 228.
- Pang, K., Van Sambeek, J.W., Navarrete-Tindall, N.E., Lin, C.-H., Jose, S. et Garrett, H.E. (2019). Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. *Agroforestry Systems*, 93(1), 11-24. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0067-8>
- Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet, G., Van Waes, C. et Reheul, D. (2018). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agricultural Systems*, 166, 135-151. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.08.008>
- Plante, P.-M., Rivest, D., Vézina, A. et Vanasse, A. (2014). Root distribution of different mature tree species growing on contrasting textured soils in temperate windbreaks. *Plant and Soil*, 380(1-2), 429-439. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2108-7>
- Pomerleau-Lacasse, F., Seguin, P., Tremblay, G.F., Bélanger, G., Lajeunesse, J. et Charbonneau, É. (2019). Alternatives to timothy grown in mixture with alfalfa in Eastern Canada. *Agronomy Journal*, 111(1), 314-327. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.05.0309>
- Putnam, D.H. et Orloff, S.B. (2014). Forage Crops. Dans *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (p. 381-405). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00142-X>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J.C., Sobecki, T.M. et Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1-2), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Reynolds, P.E., Simpson, J.A., Thevathasan, N.V. et Gordon, A.M. (2007). Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 29(4), 362-371. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2006.09.024>

- Rigden, A.J., Mueller, N.D., Holbrook, N.M., Pillai, N. et Huybers, P. (2020). Combined influence of soil moisture and atmospheric evaporative demand is important for accurately predicting US maize yields. *Nature Food*, 1(2), 127-133. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0028-7>
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A. et Olivier, A. (2009). Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(1-2), 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.011>
- Rivest, D. et Martin-Guay, M.-O. (2024). Nitrogen leaching and soil nutrient supply vary spatially within a temperate tree-based intercropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3398528/v1
- Robock, A. (2003). Hydrology | Soil Moisture. Dans J. R. Holton (dir.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (p. 987-993). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00169-X>
- Rois-Díaz, M., Lovric, N., Lovric, M., Ferreiro-Domínguez, N., Mosquera-Losada, M.R., den Herder, M., Graves, A., Palma, J.H.N., Paulo, J.A., Pisanelli, A., Smith, J., Moreno, G., García, S., Varga, A., Pantera, A., Mirck, J. et Burgess, P. (2018). Farmers' reasoning behind the uptake of agroforestry practices: evidence from multiple case-studies across Europe. *Agroforestry Systems*, 92(4), 811-828. <https://doi.org/10.1007/S10457-017-0139-9>
- Royal Eijkelkamp. (2023). *Double ring infiltrometer*. Royal Eijkelkamp B.V., Amsterdam, The Netherlands. <https://www.royaleijkelkamp.com/products/field-measuring-equipment/infiltration/infiltration/double-ring-infiltrometer/> accessed on 2023-12-05.
- Sadok, W. et Jagadish, S.V.K. (2020). The hidden costs of nighttime warming on yields. *Trends in Plant Science*, 25(7), 644-651. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.02.003>
- Sahin, H., Anderson, S.H. et Udawatta, R.P. (2016). Water infiltration and soil water content in claypan soils influenced by agroforestry and grass buffers compared to row crop management. *Agroforestry Systems*, 90(5), 839-860. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9899-x>
- Sahin, S. (2012). An aridity index defined by precipitation and specific humidity. *Journal of Hydrology*, 444-445, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.019>
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., De Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X. et Current, D. (2012). Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5), 128A-136A. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.128A>
- Seobi, T., Anderson, S.H., Udawatta, R.P. et Gantzer, C.J. (2005). Influence of grass and agroforestry buffer strips on soil hydraulic properties for an albaqualf. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 893-901. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0280>
- Sheaffer, C.C., Peterson, P.R., Hall, M.H. et Stordahl, J.B. (1992). Drought effects on yield and quality of perennial grasses in the North Central United States. *Journal of Production Agriculture*, 5(4), 556-561. <https://doi.org/10.2134/jpa1996.0556>

- Soil Classification Working Group. (1998). The Canadian System of Soil Classification, 3rd ed. Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646 (Revised).
- Staniak, M. et Kocoń, A. (2015). Forage grasses under drought stress in conditions of Poland. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37(6), 116. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1864-1>
- Sudmeyer, R.A., Hall, D.J.M., Eastham, J. et Adams, M.A. (2002). The tree-crop interface: The effects of root pruning in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42(6), 763-772. <https://doi.org/10.1071/EA02012>
- Thevathasan, N.V., Coleman, B., Zabek, L., Ward, T. et Gordon, A.M. (2018). Agroforestry in Canada and its role in farming systems. Dans A.M. Gordon, S.M. Newman et B.R.W. Coleman (dir.), *Temperate agroforestry systems* (2^e éd., p. 7-49). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781780644851.0007>
- Thevathasan, N.V. et Gordon, A.M. (2004). Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 61-62(1-3), 257-268. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029003.00933.6d>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. et Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Töchterle, P., Yang, F., Rehschuh, S., Rehschuh, R., Ruehr, N. K., Rennenberg, H. et Dannenmann, M. (2020). Hydraulic water redistribution by silver fir (*Abies alba* Mill.) Occurring under Severe Soil Drought. *Forests*, 11(2), 162. <https://doi.org/10.3390/f11020162>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G. et Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150-161. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.06.002>
- Udawatta, R.P., Kremer, R.J., Adamson, B.W. et Anderson, S.H. (2008). Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.002>
- Udawatta, R.P., Rankoth, L. M. et Jose, S. (2019). Agroforestry and biodiversity. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/su11102879>
- Undersander, D.J. (1987). Alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth response to water and temperature. *Irrigation Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/BF00256813>
- Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L. et Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
- Williams, A., Jordan, N.R., Smith, R.G., Hunter, M.C., Kammerer, M., Kane, D.A., Koide, R.T. et Davis, A.S. (2018). A regionally-adapted implementation of conservation agriculture delivers rapid improvements to soil properties associated with crop yield stability. *Scientific Reports*, 8(1), 8467. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26896-2>

- Wolz, K.J. et DeLucia, E.H. (2018). Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252(October 2017), 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.005>
- Wolz, K.J. et DeLucia, E.H. (2019). Black walnut alley cropping Is economically competitive with row crops in the Midwest USA. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 100(1), e01500. <https://doi.org/10.1002/bes2.1500>
- World Meteorological Organization. (2021). *State of Climate in 2021: Extreme Events and Major Impacts*. UNFCCC. <https://unfccc.int/news/state-of-climate-in-2021-extreme-events-and-major-impacts> accessed on 2021-11-02.
- Xu, C.-Y. et Singh, V.P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15(2), 305-319. <https://doi.org/10.1002/hyp.119>
- Yang, T., Siddique, K.H.M. et Liu, K. (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health - A review. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01118. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2020.E01118>
- Zhao, T. et Dai, A. (2015). The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario. *Journal of Climate*, 28(11), 4490-4512. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00363.1>

