



Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de la personne autrice de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'autrice ou l'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DES LÉGUMINEUSES INTERCALAIRES EN
CULTURES CÉRÉALIÈRES BIOLOGIQUES : EFFETS SUR LES ADVENTICES, LA
FERTILITÉ ET LA STRUCTURE DES SOLS

Thèse
présentée
comme exigence partielle
du doctorat sur mesure (sciences naturelles), écologie du sol et des racines

Par
Insaf Chida

Mai 2026

REMERCIEMENTS

Atteindre l'étape de la rédaction de cette thèse marque l'aboutissement de ce long parcours. Ce chemin a été jalonné de moments heureux et de défis exigeants. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenue, dont leur aide et leurs encouragements ont été essentiels à l'achèvement de ce travail.

Tout d'abord, j'adresse une attention particulière à mon directeur de thèse, Vincent Poirier, sans qui la réalisation de ce doctorat n'aurait pas été possible. Je le remercie sincèrement pour son encadrement constant, sa disponibilité et ses conseils avisés ont été déterminants à chaque étape de ce travail, depuis l'élaboration du projet jusqu'à la rédaction de la thèse, en passant par les travaux de terrain et les analyses. Sa rigueur et la pertinence de ses suggestions ont grandement contribué à la qualité des articles scientifiques produits.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Noura Ziadi, ma co-encadrante, pour avoir accepté de m'accompagner dans la finalisation de cette thèse. Je la remercie tout particulièrement, pour l'intérêt constant qu'elle a porté à ce travail, pour sa grande disponibilité malgré ses nombreuses responsabilités, ainsi que pour la pertinence de ses conseils. Son implication rigoureuse, notamment lors de la relecture attentive et de la révision approfondie de chacun des articles composant cette thèse, a été d'une contribution précieuse à l'aboutissement de ce travail.

Je souhaite également remercier chaleureusement l'équipe de l'Unité de recherche et de développement en agroalimentaire en Abitibi-Témiscamingue (URDAAT) à Notre-Dame-du-Nord pour leur accueil et leur soutien tout au long de mon séjour au laboratoire, et je tiens tout particulièrement à exprimer ma reconnaissance à Mélissa Tobler pour son aide précieuse et son accompagnement constant.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer cette thèse.

Je ne saurais oublier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, tant sur le terrain qu'au laboratoire. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Daphné

Touzin, pour son soutien dans l'établissement du dispositif expérimental et pour les longues journées passées sur le terrain. Je remercie également toutes celles et ceux qui, le temps d'une journée ou davantage, ont partagé avec moi une placette de cette aventure de terrain.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma famille. Je remercie tout particulièrement mon père pour la confiance inébranlable qu'il a toujours placée en moi, ainsi que ma mère, dont la présence constante, aux côtés de mon père, m'a apporté un soutien précieux tout au long de ce parcours. Je remercie également mon frère pour son soutien continu et les nombreuses marques d'encouragement qu'il m'a témoignées au cours de cette aventure, ainsi que mon mari pour sa patience et son accompagnement sans faille. Leur amour et leur présence m'ont permis d'avancer, même dans les moments les plus difficiles. Je souhaite aussi adresser mes sincères remerciements à mes amis Achref, Rania, Eya et Karim pour leur soutien fidèle et leur présence à mes côtés, ainsi qu'à ma belle-sœur Férielle pour son affection et son appui précieux.

DÉDICACE

À la mémoire de mon grand-père Babouda, source d'inspiration et de valeurs qui continuent de me guider.

À mon fils Jad de neuf mois, nouveau souffle de ma vie et espoir de demain.

Cette thèse est dédiée à ceux qui me relient au passé et m'ouvrent à l'avenir.

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été rédigée sous forme de thèse par articles. Elle se compose de trois chapitres, chacun correspondant à un article scientifique, dont deux rédigés en anglais et un rédigé en français. L'introduction générale présente le contexte de l'étude, définit la problématique et explicite les principales questions de recherche à l'origine de ce travail. Elle précise également les objectifs et les hypothèses propres à chacun des chapitres, et présente la zone d'étude. Une conclusion générale synthétise ensuite les principaux résultats, formule des recommandations, discute les limites de l'étude et propose des perspectives de recherche.

Le Chapitre 1 a été publié le 27 mars 2026 dans la revue *Agronomy* (MDPI) sous le titre "Do Intercropped Legumes Alter Weed Communities in Organic Field Crops? A Taxonomic and Functional Perspective". Le Chapitre 2 a déjà été soumis au *Canadian Journal of Plant Science* (CJPS). Quant au Chapitre 3, il sera traduit dans les semaines suivant le dépôt final de la thèse et fera l'objet d'une soumission ultérieure dans une revue scientifique à déterminer.

Bien que j'aie rédigé cette thèse, celle-ci s'inscrit dans un travail collaboratif réalisé sous la direction de Vincent Poirier et le co-encadrement de Noura Ziadi. Ce projet a bénéficié du soutien financier du programme Prime-Vert (projet no 5992726), un programme provincial québécois géré par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) visant à encourager l'adoption de pratiques agroenvironnementales durables. J'ai également bénéficié de l'attribution d'une bourse nationale de Tunisie couvrant les trois premières années de mon doctorat, assurant un soutien essentiel à la réalisation de cette thèse.

En tant que première auteure, j'ai rédigé les versions initiales des Chapitres 1, 2 et 3, tandis que les co-auteurs ont participé à leur révision et ont approuvé la version finale en vue de la publication. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Daphné Touzin (MAPAQ), qui a contribué à l'élaboration du dispositif expérimental sur les deux sites.

La répartition des contributions des co-auteurs est la suivante : Vincent Poirier a assuré l'acquisition du financement, la gestion et la coordination du projet. Il a également contribué à la conceptualisation des idées de recherche, à l'élaboration de la méthodologie, ainsi qu'aux jeux de données pour les Chapitres 2 et 3, à la validation des résultats, à la supervision scientifique, à la révision de tout le manuscrit, et à la mise à disposition des ressources, du matériel et des outils nécessaires à l'analyse. Noura Ziadi a participé à la conceptualisation des idées de recherche, à la supervision scientifique, à la révision des manuscrits des trois chapitres et elle a également veillé à ce que les articles traduits en anglais soient relus et validés par des professionnels.

Par ailleurs, l'apport de Gaëtan D'Aigle, statisticien, a permis de valider et de bonifier les analyses statistiques des chapitres 1, 2 et 3. Son expertise a été utilisée pour ajuster et améliorer les codes analytiques.

Toutes les références mentionnées dans chacun des chapitres sont regroupées à la fin de ce manuscrit, accompagnées du matériel complémentaire associé à chaque chapitre.

Chapitre 1 : Chida, I., Ziadi, N., & Poirier, V. (2026). Do Intercropped Legumes Alter Weed Communities in Organic Field Crops? A Taxonomic and Functional Perspective. Article publié dans la revue *Agronomy*.

Chapitre 2 : Chida, I., Ziadi, N., & Poirier, V. (2026). Impact of intercropped legumes on crop yields, weed biomass, and nitrogen and carbon inputs in organic cereals. Manuscrit soumis au *Canadian Journal of Plant Science (CJPS)*.

Chapitre 3 : Chida, I., Ziadi, N., & Poirier, V. (2026). Influence des légumineuses intercalaires et du mode d'implantation sur la biomasse racinaire et les propriétés physicochimiques du sol en cultures céréalières biologiques. Ce chapitre sera traduit dans les semaines suivant le dépôt final de la thèse et fera l'objet d'une soumission ultérieure dans une revue scientifique à déterminer.

Les résultats de cette thèse ont fait l'objet de présentations lors de conférences nationales comme suit :

Présentations orales :

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2019). Essai d'implantation de légumineuses intercalaires en cultures annuelles biologiques et impacts sur la lutte aux adventices et les propriétés physiques et biologiques du sol. Présentation orale. 33e congrès annuel de l'Association québécoise de spécialistes en sciences du sol, Duhamel-Ouest, Canada, 11 juin - 14 juin.

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2020). Implantation de légumineuses intercalaires en cultures annuelles biologiques et impacts sur la lutte aux adventices et les rendements de cultures. Présentation orale, 11e Colloque annuel du Centre de la science de la biodiversité du Québec (CSBQ), Montréal, Canada, 14–16 décembre.

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2021). Establishment of intercropping legumes in organic annual crops and impact on weed control. Communication orale. Northern Ontario Farm Innovation Alliance, 2 février.

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2021). Intercropping legumes in annual crops affects above- and belowground biomass production and surface soil properties. Communication orale. Congrès de la Société canadienne de science du sol, 10 mai.

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2021). Intercropping legumes in annual crops affect above- and below-ground biomass production and surface soil properties. Congrès de l'Association québécoise des spécialistes en sciences du sol (AQSSS), Québec, Canada, 15 juin.

Présentation par affiche :

Chida, I., Poirier, V., & Touzin, D. (2019). Weed community responses to intercropping legumes in organic cereal cropping systems. 13e Colloque de la Société québécoise de phytotechnologie (SQP), Jardin botanique de Montréal, Canada, 2 mai.

RÉSUMÉ

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la transition vers des systèmes de production céréalière biologique, où la gestion des adventices et la fertilité des sols représentent des défis majeurs. Elle vise à évaluer le potentiel des cultures de couverture implantées en intercalaire synchrone dans les systèmes céréaliers biologiques pour fournir des services écosystémiques clés, notamment la régulation des adventices, l'amélioration de la fertilité des sols et le maintien de la productivité des cultures.

Un dispositif expérimental a été mis en place en Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada), sur deux sites (Poularies et Laverlochère) pendant deux années consécutives (2019 et 2020), dans des cultures d'avoine et de blé biologiques. Plusieurs espèces de légumineuses intercalaires (*Melilotus officinalis*, *Trifolium incarnatum*, *Trifolium repens* et *Trifolium pratense*) ont été comparées à un témoin sans légumineuse, selon deux modes d'implantation (au semis et au tallage).

Les résultats montrent que les légumineuses intercalaires influencent de manière significative la composition et la diversité des adventices. Le trèfle incarnat s'est distingué par une forte capacité de couverture du sol, réduisant l'abondance et la diversité des adventices, mais favorisant des espèces à stratégie orientée vers l'acquisition de ressources, tandis que la communauté du témoin présentait une teneur en matière sèche foliaire plus élevée, traduisant une stratégie de conservation des ressources. Ces résultats soulignent l'importance d'une approche combinant analyse taxonomique et traits fonctionnels pour mieux comprendre l'impact des légumineuses intercalaires sur la diversité et les stratégies fonctionnelles des communautés adventices.

Sur le plan agronomique, l'intégration des légumineuses intercalaires n'a pas affecté les rendements des céréales, tout en contribuant à la production de biomasse aérienne et racinaire et à l'apport de carbone et d'azote au sol. Bien que les quantités de C et de N apportées soient quantitativement modestes (11–15 kg N ha⁻¹ et 144–

200 kg C ha⁻¹), elles constituent une source de nutriments labiles et facilement disponibles pour le sol. Le mode d'implantation s'est révélé déterminant : un semis précoce favorise une biomasse racinaire plus dense, une meilleure qualité chimique des racines et un rapport C/N plus faible.

Cette étude met également en évidence les interactions complexes entre les cultures intercalaires et leur influence sur la structure et la fertilité du sol, soulignant le potentiel des combinaisons de légumineuses pour améliorer la productivité et la qualité des sols en agriculture biologique. Les effets varient selon les espèces : le trèfle blanc se distingue par sa capacité à enrichir le sol en carbone et en azote, tandis que le trèfle incarnat contribue à l'amélioration de la structure physique du sol, notamment par l'augmentation de la stabilité des macroagrégats. Ces résultats mettent en évidence la complémentarité fonctionnelle des espèces et soulignent l'importance d'un choix judicieux des espèces et des modalités d'implantation pour optimiser les services écosystémiques.

L'ensemble de ces travaux ouvre des perspectives pour optimiser la gestion des cultures intercalaires et proposer des solutions durables pour la production céréalière biologique.

Mots-clés : Agriculture biologique ; Légumineuses intercalaires; Services écosystémiques ; Gestion des adventices ; Traits fonctionnels; Fertilité des sols; Structure du sol; Azote et carbone du sol; Biomasse racinaire et aérienne.

Keywords: Organic agriculture; Intercropped legumes; Ecosystem services; Weed management; Functional traits; Soil fertility; Soil structure; Soil nitrogen and carbon; Above- and belowground biomass

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
DÉDICACE	V
AVANT-PROPOS	VII
RÉSUMÉ	XI
TABLE DES MATIÈRES	XIII
LISTE DES FIGURES	XVI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIX
LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	XXI
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	XXIII
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Cadre théorique et conceptuel.....	4
1.2.1 Écologie fonctionnelle.....	4
1.2.2 Les traits fonctionnels	6
1.2.3 L'approche fonctionnelle appliquée dans les systèmes agricoles	9
1.2.4 Pratiques culturales en céréaliculture	11
1.2.5 Rôle de l'enherbement dans la lutte contre les adventices	14
1.2.6 Impact de l'enherbement sur le fonctionnement du sol	14
1.3 Objectifs et hypothèses de recherche.....	16
1.3.1 Objectif spécifique 1	16
1.3.2 Objectif spécifique 2	17
1.3.3 Objectif spécifique 3	18
1.4 Méthodologie générale.....	19
2. DO INTERCROPPED LEGUMES ALTER WEED COMMUNITIES IN ORGANIC FIELD CROPS? A TAXONOMIC AND FUNCTIONAL PERSPECTIVE	21
2.1 Résumé.....	22
2.2 Abstract.....	23
2.3 Introduction	24
2.4 Materials and Methods	27
2.4.1 Characteristics of the study site	27

2.4.2	Description of the experimental design	28
2.4.3	Botanical survey and composition.....	29
2.4.4	Species richness and diversity of communities	30
2.4.5	Functional traits of weed species and communities	30
2.4.6	Statistical analyses	32
2.5	Results	33
2.5.1	Botanical surveys and composition.....	33
2.5.2	Species richness (S) and Shannon diversity (H')	36
2.5.3	Species' functional traits	37
2.5.4	Functional structuring of the weed communities	38
2.6	Discussion.....	43
2.6.1	Structure, diversity, and composition of weed communities	43
2.6.2	Functional structure response.....	45
2.7	Conclusion	47
2.8	Acknowledgements	48
3.	IINTERCROPPING LEGUMES IN ORGANIC CEREAL PRODUCTION: IMPACTS ON CROP YIELDS, WEEDS, AND CARBON AND NITROGEN INPUTS. 49	
3.1	Résumé.....	50
3.2	Abstract.....	51
3.3	Introduction	52
3.4	Materials and Methods	54
3.4.1	Study sites	54
3.4.2	Experimental design	56
3.4.3	Grain harvest and yield analysis	58
3.4.4	Cover crop and weed biomass	59
3.4.5	Analysis of C and N concentrations in legume above-ground biomass 59	
3.4.6	C and N input from above-ground legume biomass	60
3.4.7	Statistical analyses	60
3.5	Results	61

3.5.1	Crop yields	61
3.5.2	Biomass of weeds and legumes	61
3.5.3	C and N concentrations in legume above-ground biomass	65
3.5.4	N and C inputs from above-ground biomass.....	67
3.6	Discussion.....	69
3.6.1	Crop yields	69
3.6.2	Weed biomass.....	71
3.6.3	Biomass production and N and C inputs from legumes.....	73
3.7	Conclusion	75
4.	INFLUENCE DES LÉGUMINEUSES INTERCALAIRES ET DU MODE D'IMPLANTATION SUR LA BIOMASSE RACINAIRE ET LES PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DU SOL EN CULTURES CÉRÉALIÈRES BIOLOGIQUES	77
4.1	Résumé.....	78
4.2	Abstract.....	79
4.3	Introduction	80
4.4	Matériels et méthode.....	82
4.4.1	Présentation des sites d'études	82
4.4.2	Échantillonnage et analyses des racines	83
4.4.3	Échantillonnage et analyses du sol.....	84
4.4.4	Analyses statistiques	86
4.5	Résultats	87
4.5.1	Composition chimique des racines et biomasse racinaire.....	87
4.5.2	Propriétés indicatrices de l'état de santé des sols.....	90
4.6	Discussion.....	92
4.6.1	Contribution racinaire des légumineuses à la fertilité du sol.....	92
4.6.2	Effets des traitements sur les propriétés physicochimiques du sol.....	94
4.7	Conclusion	95
5.	CONCLUSION GÉNÉRALE	104
	APPENDICE A –.....	107
	LISTE DE RÉFÉRENCES	111

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Exemple de fonctions définies au niveau d'organisation des individus et marqueurs (i.e., traits) fonctionnels qui y sont reliés (adapté de Garnier et Navas, 2012).	7
Figure 2 Comparison of Shannon diversity indices (H') in an organic oat crop synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes averaged over the two years of the study. The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within $1.5\times$ the interquartile range. Treatments with values associated with different letters differ significantly from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$	37
Figure 3 Aggregated traits of weed communities observed in an organic oat crop in 2019, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (Mo = <i>Melilotus officinalis</i> , Ti = <i>Trifolium incarnatum</i> , Tr = <i>Trifolium repens</i>). The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within $1.5\times$ the interquartile range. For each aggregated trait, treatments with values labeled with different letters are significantly different from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$	39
Figure 4 Aggregated traits of weed communities observed in an organic oat crop in 2020, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (Mo = <i>Melilotus officinalis</i> , Ti = <i>Trifolium incarnatum</i> , Tr = <i>Trifolium repens</i>). The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within $1.5\times$ the interquartile range. For each aggregated trait, treatments with values labeled with different letters are significantly different from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$	40

Figure 5 Redundancy analysis showing the distribution of weed leaf traits according to the dominant species in an organic oat crop in 2019, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (*M. officinalis*, *T. incarnatum*, *T. repens*). SLA = specific leaf area, LDMC = leaf dry matter content, LA = leaf area..... 41

Figure 6 Redundancy analysis showing the distribution of weed leaf traits according to the dominant species in an organic oat crop in 2020, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (*M. officinalis*, *T. incarnatum*, *T. repens*). SLA = specific leaf area, LDMC = leaf dry matter content, LA = leaf area..... 42

Figure 7 Above-ground biomass produced by weeds at the Laverlochère and Poularies sites in 2019 (a, b) and in 2020 (c, d). Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the mean values differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test. Please note the changes in scale from one graph to another on the y-axis. 62

Figure 8 Above-ground biomass produced by legumes at the Laverlochère and Poularies sites in 2019 (a, b) and in 2020 (c, d). Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the mean values differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test. Please note the changes in scale from one graph to another on the y-axis. 64

Figure 9 Nitrogen (N) (a, b) and carbon (C) (c, d) inputs from legume above-ground biomass at the Laverlochère and Poularies sites in 2019. Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the means differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test..... 68

Figure 10 Nitrogen (N) (a, b) and carbon (C) (c, d) inputs from legume above-ground biomass at the Laverlochère and Poularies sites in 2020. Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the means differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test..... 69

Figure 11 Stocks de carbone (C) (a) et d'azote (N) (b) de la biomasse racinaire retrouvée dans l'entre-rang entre 0 et 6 cm de profondeur à Laverlochère en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses (P_{Leg}) et du mode d'implantation (P_{Imp}) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer. 88

Figure 12 Stocks de carbone (C) (a) et d'azote (N) (b) de la biomasse racinaire dans l'entre-rang entre 0 et 15 cm de profondeur à Poularies en 2020. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses ($P_{Leg} \times Imp$) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer. 89

Figure 13 Concentrations en carbone (C) (a) et en azote (N) (b) du sol dans l'entre-rang entre 0 et 6 cm de profondeur à Laverlochère en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses (P_{Leg}), du mode d'implantation (P_{Imp}) et de leurs interactions ($P_{Leg} \times Imp$) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer. 90

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 Exemples de traits fonctionnels étudiés, de caractéristiques écologiques qui leur sont liées et de services écosystémiques sur lesquels ils peuvent agir (adapté de Martenot, 2017).	8
Table 2 Weather data during the 2019 and 2020 growing seasons in Poularies	28
Table 3 botanical composition in 2019 in organic oat plots with or without intercropped legumes	34
Table 4 Total botanical composition in 2020 in organic oat plots with or without intercropped legumes	35
Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for species richness and Shannon index as affected by the intercrop legume treatment, year, and their interaction	36
Table 6 Weather data during the 2019 and 2020 growing seasons in Poularies† and Laverlochère‡	56
Table 7 Dates of fieldwork conducted between 2019 and 2020 in Poularies and Laverlochère	58
Table 8 Carbon (C) and nitrogen (N) concentrations and C/N ratio of aboveground legume biomass harvested in 2020 in Laverlochère and Poularies	65
Tableau 9 Pourcentage de biomasse (2019 et 2020) des légumineuses et adventices retrouvées dans l'entre-rang	97
Tableau 10 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2019	98
Tableau 11 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2020	99

Tableau 12 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les propriétés des sols à 0-6 cm de profondeur en 2019	100
Tableau 13 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les propriétés des sols à 0-15 cm de profondeur en 2020	101
Tableau 14 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la stabilité de la structure du sol à 0-6 cm de profondeur en 2019.....	102
Table 15 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la stabilité de la structure du sol à 0-15 cm de profondeur en 2020.....	103
Table 16 Mean ($\pm$ standard deviation) of leaf trait values for the most abundant weed species in each intercropped legume treatment (Mo = <i>Melilotus officinalis</i> , Ti = <i>Trifolium incarnatum</i> , Tr = <i>Trifolium repens</i> , Control = control) in 2019	107
Table 17 Mean ($\pm$ standard deviation) of leaf trait values for the most abundant weed species in each intercrop legume treatment (MO = <i>Melilotus officinalis</i> , TI = <i>Trifolium incarnatum</i> , TR = <i>Trifolium repens</i> , Control = without legumes) in 2020.	108
Table 18 Mean (standard deviation) of leaf trait values for intercrop legume species in 2019 and 2020.....	110

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

SI	Synchronous Intercropping (culture intercalaire synchrone)
H'	Indice de diversité de Shannon
S	Richesse en espèces
Dfb	Classification climatique de Köppen (continental froid humide avec été tempéré)
Bt	Horizon d'accumulation d'argile dans le sol
LDMC	Leaf Dry Matter Content (teneur en matière sèche foliaire)
SLA	Specific Leaf Area (surface foliaire spécifique)
LA	Leaf area (Surface foliaire)
Trait_CWM	Valeur agrégée des traits au niveau communauté
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
FAO	Food and Agriculture Organization
CEROM	Centre de recherche sur les grains (St-Mathieu-de-Beloeil, Québec)
AAFC	Agriculture and Agri-Food Canada
RDA	Redundancy Analysis (Analyse de redondance)
C	Carbone
N	Azote
C/N	Rapport C/N
BA_LEG	Biomasse aérienne des légumineuses
C Input	Apport en carbone de la biomasse aérienne des légumineuses
N Input	Apport en azote de la biomasse aérienne des légumineuses

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

cm	centimètre
cm²	centimètre carré
g	gramme
ha	hectare
kg	kilogramme
m	mètre
mm	millimètre
mg	milligramme
%	pourcentage
°C	degré Celsius
h	heure

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 *Mise en contexte*

L'agriculture biologique, face aux enjeux environnementaux et sanitaires contemporains, favorise des pratiques agricoles destinées à garantir la durabilité des écosystèmes tout en préservant la qualité des sols et des ressources naturelles. L'usage des produits phytosanitaires suscite des préoccupations croissantes en raison de leurs impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement, ce qui a conduit les autorités à mettre en place des politiques visant à réduire ces effets néfastes. Au Québec, l'engagement à diminuer de 25 % les risques liés à ces produits reflètent une volonté de promouvoir une agriculture plus durable (MAPAQ, 2020). En 2017, une baisse de 1,3 % des ventes de pesticides a été observée, ce qui pourrait signaler une prise de conscience croissante et un soutien accru à des pratiques agricoles plus raisonnées et respectueuses de l'environnement (MAPAQ, 2020).

Parmi ces approches, l'enherbement qu'il soit spontané ou introduit par semis est de plus en plus recommandé comme une solution viable pour favoriser une agriculture plus raisonnée. Les recherches récentes mettent en lumière l'intégration d'espèces intercalaires, qui présente des avantages écologiques significatifs. Cela inclut l'amélioration de la qualité du sol, la promotion de la biodiversité et le renforcement des services écosystémiques (Brooker et al., 2015).

L'enherbement avec des légumineuses suscite un intérêt croissant, notamment dans les systèmes de culture céréalière. Cette technique, qui consiste à semer des légumineuses entre les rangs de céréales, présente plusieurs atouts, dont un meilleur contrôle des adventices, une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, une amélioration de la fertilité des sols grâce à la fixation de l'azote et une préservation de la qualité de l'eau (Altieri, 2018 ; Merfield, 2023). Néanmoins, bien que l'enherbement soit perçu comme bénéfique pour l'environnement, sa mise en œuvre reste complexe. En effet, son efficacité dépend fortement de l'adaptation aux conditions locales, telles que le type de sol, le climat et les objectifs de production (González et al., 2020 ; Brooker et al., 2015).

Des recherches récentes soulignent que la gestion adéquate des facteurs environnementaux et agronomiques est essentielle pour optimiser les bénéfices des enherbements tout en minimisant les risques liés à la compétition excessive entre les légumineuses et les cultures principales (Sias et al., 2021). Par ailleurs, l'intégration d'espèces intercalaires présente des avantages écologiques significatifs, notamment en favorisant la santé des sols, en soutenant la biodiversité et en renforçant les processus de régulation des écosystèmes (Brooker et al., 2015).

En adoptant une approche d'écologie fonctionnelle comparative, il devient possible de déterminer quelles stratégies d'enherbement sont les plus adaptées pour maximiser les bénéfices environnementaux tout en tenant compte des traits fonctionnels des espèces choisies. Ces traits, qui incluent des caractéristiques morphologiques, physiologiques et phénologiques, jouent un rôle essentiel dans la résilience et la performance des espèces en milieu agricole (Díaz et al., 2021). Ces avancées soulignent l'importance d'orienter les pratiques agricoles vers des solutions durables, capables de répondre aux défis environnementaux contemporains tout en soutenant la productivité agricole. Outre les bénéfices écologiques, l'implantation des légumineuses comme cultures intercalaires peut influencer les rendements des cultures principales et la gestion efficace des adventices, éléments cruciaux pour la viabilité économique des exploitations biologiques (Liu et al., 2023).

Problématique

Cette thèse s'intéresse précisément aux impacts de l'enherbement avec des légumineuses intercalaires dans les systèmes de cultures céréalières biologique. Plus particulièrement, elle explore comment différentes pratiques de gestion du sol influencent à la fois la composition de la flore adventice, la performance des cultures et la qualité du sol. Elle cherche également à déterminer si l'utilisation des légumineuses intercalaires représente une solution viable pour lutter contre les adventices et améliorer les propriétés du sol dans le contexte de l'agriculture biologique. À ce jour, bien que certaines études aient tenté de caractériser la flore adventice associée aux enherbements (Gago et al., 2006), la majorité des travaux se

sont longtemps concentrés sur une approche taxonomique de la flore, négligeant les dimensions écologiques et fonctionnelles qui influencent réellement la dynamique des enherbements. Toutefois, cette tendance évolue, notamment en Europe où plusieurs équipes de recherche utilisent désormais des approches basées sur les traits fonctionnels (Bourgeois et al., 2019 ; Fried et al., 2021; Guerra et al., 2022). Ces travaux montrent que les caractéristiques des espèces influencent fortement la dynamique des communautés, même si leur intégration en agronomie reste encore limitée. Cette thèse propose d'apporter un éclairage nouveau en s'appuyant sur une approche d'écologie fonctionnelle, permettant de mieux comprendre les mécanismes de colonisation des adventices et d'optimiser les choix d'espèces et de pratiques agricoles pour améliorer la durabilité des systèmes de culture.

Dans cette optique, plusieurs questions ont été formulées : Comment les différentes pratiques de gestion du sol et l'implantation de légumineuses intercalaires influencent-elles la composition et la diversité des communautés d'adventices dans les cultures céréalières biologiques ? Quelles espèces et quelles modalités d'implantation permettent à la fois de lutter efficacement contre les adventices, d'optimiser les rendements des cultures, la biomasse aérienne, ainsi que les apports en carbone et en azote associés ? Enfin, comment ces légumineuses intercalaires interagissent-elles avec les adventices pour affecter la biomasse racinaire, la structure, la fertilité et la qualité des sols ?

Pour répondre à ces questions, la thèse s'articule autour de trois axes principaux, correspondant aux trois articles du manuscrit :

- Étudier les effets des légumineuses intercalaires sur la composition et la diversité des communautés d'adventices.
- Quantifier l'impact des légumineuses intercalaires sur les rendements des cultures, les adventices et les apports en carbone et en azote.
- Évaluer l'impact des espèces intercalaires et des adventices sur la biomasse racinaire et les propriétés physico-chimiques du sol selon les différentes modalités d'enherbement.

En abordant cette problématique sous plusieurs angles, cette thèse vise à enrichir la réflexion sur l'intégration des légumineuses intercalaires dans les systèmes céréaliers biologiques en fournissant des réponses concrètes aux défis agronomiques et environnementaux rencontrés par les entreprises agricoles.

1.2 *Cadre théorique et conceptuel*

1.2.1 Écologie fonctionnelle

Le développement d'une approche fonctionnelle dans l'étude des systèmes écologiques requiert une reformulation de certaines questions fondamentales relatives à leurs composantes. Bien que l'aspect taxonomique, qui se concentre sur l'identité et l'anatomie des espèces, reste pertinent pour aborder ces interrogations (Wood et al., 2015), l'approche fonctionnelle se distingue par son accent sur l'identification des traits spécifiques à chaque groupe de plantes. Cela offre un potentiel important pour explorer des problématiques écologiques complexes, notamment en facilitant l'évaluation des réponses des écosystèmes aux changements environnementaux et aux perturbations anthropiques (Kraft et al., 2015).

Parmi ces problématiques, il est essentiel de se demander comment la distribution des organismes varie selon les gradients environnementaux (Westoby et al., 2025) et quelles règles régissent l'assemblage des espèces au sein des communautés (McGill et al., 2007). L'écologie fonctionnelle englobe ainsi une vaste gamme de questions cruciales pour comprendre les interactions écologiques. De plus, les traits fonctionnels peuvent être utilisés pour prédire les réponses des communautés aux changements environnementaux, renforçant leur importance dans le contexte des changements climatiques (Díaz et al., 1998).

Cette discipline comporte plusieurs branches, et ce projet de thèse s'inscrit particulièrement dans le cadre de l'écologie fonctionnelle comparative. Dans le premier numéro de la revue *Functional Ecology*, Anthony Bradshaw (1987), soulève une question clé : « Pourquoi la valeur d'une fonction particulière se trouve-t-elle à un endroit donné ? » (Lavorel et Garnier, 2002). Cette interrogation adopte une perspective adaptative, où Bradshaw affirme que « l'adaptation ne peut être mesurée

que sur une base comparative ». Pour comprendre pourquoi une espèce s'établit dans un milieu spécifique plutôt qu'un autre, il est essentiel de la comparer avec d'autres espèces ou organismes.

Bradshaw (1987) soutient également que « l'adaptation, et donc l'écologie fonctionnelle, est un concept comparatif » (Lavorel et Garnier, 2002). Cela met en lumière l'importance des études comparatives pour analyser les mécanismes d'adaptation et de coexistence des espèces dans divers habitats (Violle et al., 2007). De plus, l'intégration des traits fonctionnels dans l'analyse des réponses des espèces aux changements environnementaux permet d'éclairer des enjeux cruciaux liés à la biodiversité et à la résilience des écosystèmes face aux perturbations (Díaz et al., 2016).

Des recherches récentes soulignent également l'importance de la diversité fonctionnelle pour la stabilité des écosystèmes. Par exemple, Isbell et al. (2017) démontrent que des communautés avec une plus grande diversité fonctionnelle sont souvent plus résilientes face aux stress environnementaux. De même, la compréhension des relations entre les traits fonctionnels et les processus écologiques, comme la productivité et la décomposition, est essentielle pour développer des stratégies de conservation efficaces (Suding et al., 2015). La compréhension des relations entre les traits fonctionnels et les processus écologiques est également cruciale. Selon Wright et al. (2017), ces relations jouent un rôle déterminant dans des processus tels que la décomposition et la dynamique des nutriments, ce qui est essentiel pour développer des stratégies de conservation efficaces. En outre, une étude récente de Ma et al. (2021) a démontré que la diversité fonctionnelle favorise non seulement la résilience des écosystèmes, mais aussi leur capacité à s'adapter aux changements climatiques, soulignant l'importance de préserver cette diversité dans les efforts de gestion des écosystèmes.

Ainsi, l'écologie fonctionnelle comparative se révèle essentielle pour une compréhension approfondie des dynamiques écologiques et des interactions entre les espèces et leur environnement.

1.2.2 Les traits fonctionnels

Depuis longtemps, les scientifiques ont cherché à mettre en évidence des principes permettant de comparer les espèces végétales et de représenter leur performance et leur statut écologique dans l'écosystème (Violle et al., 2007). Aujourd'hui, une démarche classique en écologie est basée sur l'utilisation des traits de vie des plantes en se référant aux classifications fonctionnelles, associant forme et fonction des espèces (Lavorel et al., 1997). Selon la discipline considérée, il existe de nombreuses définitions des traits fonctionnels en fonction du niveau d'organisation retenu (i.e., individu, population, communauté ou écosystème), ou selon que l'on considère leur rôle dans le fonctionnement de l'écosystème (Lavorel et Garnier, 2002).

Des exemples de fonctions définies au niveau de l'individu dans le cas spécifique des végétaux sont illustrés à la figure 1, dont la partie gauche illustre différentes fonctions biologiques telles que la croissance, la compétition et la reproduction. Le degré d'expression de ces fonctions entre les différents individus d'une population, entre populations d'une même espèce ou entre espèces constituent la diversité fonctionnelle des plantes (Garnier et Navas, 2012).

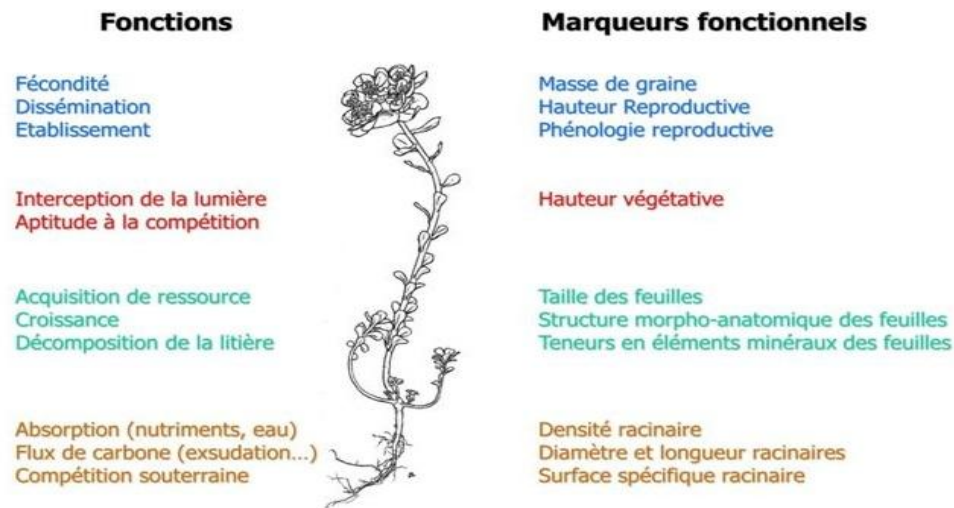


Figure 1. Exemple de fonctions définies au niveau d'organisation des individus et marqueurs (i.e., traits) fonctionnels qui y sont reliés (adapté de Garnier et Navas, 2012).

Le côté droit de la figure 1, représente des exemples de marqueurs fonctionnels tels que la masse des graines, la taille des feuilles ou encore la densité racinaire, en lien avec les fonctions écologiques que ces marqueurs permettent d'appréhender (Garnier et Navas, 2012). L'ensemble des marqueurs fonctionnels constituent des caractéristiques mesurables des organismes, appelées « traits » (Violle et al., 2007). Violle et al. (2007) ont rapporté que le terme « trait » a été défini et employé avec différents sens en écologie et en biologie des populations. Ainsi, un trait correspond à toute caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable au niveau d'un individu, de la cellule à l'organisme entier, sans qu'il ne soit fait référence à aucun autre niveau d'organisation ni à aucun facteur du milieu (Violle et al., 2007).

Tableau 1 Exemples de traits fonctionnels étudiés, de caractéristiques écologiques qui leur sont liées et de services écosystémiques sur lesquels ils peuvent agir (adapté de Martenot, 2017).

Traits (abréviation, unité)	Caractéristiques écologiques	Services écosystémiques
Surface foliaire spécifique (SLA, m² kg⁻¹)	• Taux de croissance • Capacité de couverture du sol • Stratégie d'acquisition ou de conservation des ressources	• Absorbe l'impact des gouttes de pluie • Limite le ruissellement de l'eau et l'érosion du sol
Teneur en matière sèche de la feuille (LDMC, mg g⁻¹)	• Production et taux de décomposition du paillis • Stratégie d'acquisition ou de conservation des ressources	• Limite l'érosion • Limite l'évapotranspiration • Améliore la stabilité de la structure du sol
Hauteur de la plante (cm)	• Capacité de développement de la plante	• Peut compétitionner avec la culture principale et les adventices

Le tableau 1 montre les trois traits fonctionnels des parties aériennes des plantes les plus importants en lien avec les services d'amélioration de la stabilité, de la fertilité et de la recharge en eau du sol (Martenot, 2017). On trouve notamment que les deux traits foliaires, à savoir la surface spécifique foliaire (SLA) et la hauteur de la plante, sont connus comme étant des traits qui témoignent de la capacité de développement de la plante en relation avec sa stratégie d'acquisition des ressources (Damour et al., 2015). Notamment, les espèces ayant une SLA et une hauteur élevée sont celles qui se caractérisent par une croissance rapide, dont la stratégie est axée sur l'acquisition des ressources (Tribouillois et al., 2015).

De telles espèces ont un pouvoir compétitif important et pourraient limiter la croissance des adventices. Quant aux traits de teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) et teneur en matière sèche de la plante entière (DMC), ils sont associés à la production et aux taux de décomposition de la litière (Kazakou et al., 2016). Ainsi, les espèces ayant une LDMC et une DMC élevées seront en mesure de produire une litière plus difficile à décomposer, offrant une meilleure protection de la surface du sol.

Cela permet aux espèces de limiter le ruissellement de l'eau, l'érosion et la destruction de la structure du sol par l'impact des gouttes de pluie. De telles espèces possèdent des stratégies axées sur la conservation des ressources, mais elles se développent plus lentement (Wright et al., 2004). En revanche, une litière plus facilement décomposable (LDMC et DMC plus faibles) pourrait stimuler l'activité microbienne et ainsi influencer positivement le développement d'agrégats stables à l'eau. Il faut savoir qu'il existe un compromis entre les traits foliaires permettant une acquisition rapide et une conservation efficace des ressources (Wright et al., 2004).

Le type de relations existant entre les stratégies des espèces et leurs traits apparaît comme un marqueur de l'adaptation des plantes aux stress. Par exemple, les variations continues des traits liés à l'acquisition des ressources (i.e., SLA, hauteur) traduisent le remplacement d'espèces tolérantes au stress par des espèces rudérales le long du gradient d'intensité d'utilisation (Grime, 2001 ; Fayolle, 2008). La littérature révèle qu'il existe un concept déterminant l'identification des stratégies écologiques qui correspond notamment au regroupement des espèces sur la base d'une réponse aux facteurs environnementaux et/ou sur la base de traits fonctionnels (Gitay et Noble, 1997).

1.2.3 L'approche fonctionnelle appliquée dans les systèmes agricoles

La littérature révèle que la plupart des études sur l'écologie des adventices ont porté sur la caractérisation taxonomique de la composition et de la structure des communautés de mauvaises herbes (Lososova et al., 2004 ; Fried et al., 2008). Cependant, la diversité des traits fonctionnels est une facette de la biodiversité qui est directement liée aux espèces et aux réponses des communautés aux pratiques de gestion, avec des conséquences pour les services écosystémiques (Naeem et Wright, 2003). Plus récemment, l'approche comparative en écologie basée sur les traits a été étudiée sur les cultures annuelles (Fried et al., 2012). On trouve, comme exemple, deux enquêtes à grande échelle menées sur les cultures de blé d'hiver en France dans les années 1970 et 2000. Ces enquêtes ont été utilisées pour déterminer

l'influence de la gestion des cultures sur les communautés d'adventices en utilisant une approche fonctionnelle afin d'identifier les mécanismes associés au changement de statut des adventices (Fried et al., 2012). Largement utilisées au cours des deux dernières décennies dans le domaine de la gestion des adventices, les approches fonctionnelles ont fourni des informations générales sur la réponse des communautés d'adventices aux pratiques agricoles (Gaba, 2017).

Plusieurs articles de synthèse suggèrent qu'une approche fonctionnelle basée sur les traits pourrait contribuer à une meilleure compréhension de l'influence qu'exercent les racines des plantes sur les processus pédologiques (Zhang et Wang, 2015 ; Freschet et al., 2013). D'énormes progrès scientifiques ont été réalisés dans la compréhension de la dynamique de stabilisation du carbone dans le sol (Hobley et al., 2014). La stabilisation du carbone dans le sol améliore la fertilité, la stabilité structurale du sol et la productivité agricole, favorisant ainsi la sécurité alimentaire et nutritionnelle (Lal et al., 2015). De nombreux éléments de preuve démontrent que les apports de carbone provenant des racines contribuent davantage que ceux provenant des parties aériennes à la rétention du carbone dans le sol (Rasse et al., 2005 ; Ghafoor et al., 2017). Diverses caractéristiques des racines contribuent substantiellement à la formation de la matière organique stable du sol (Poirier et al., 2018). Parmi les éléments de preuve qui mettent en évidence la contribution des racines à la structuration du sol, mentionnons la diversité de profondeur des racines selon les espèces, la libération d'exsudats et la capacité des racines à former des associations symbiotiques avec des bactéries et des champignons du sol (Poirier et al., 2018). Tous ces éléments jouent un rôle clé dans l'accumulation du carbone dans le sol (Ghafoor et al., 2017 ; Lehmann et Kleber, 2015 ; Phillips et al., 2013).

Une étude de Poirier et al. (2018) a démontré que 18 traits racinaires provenant de cinq catégories (architecturales, morphologiques, physiologiques, symbiotiques et chimiques) peuvent influencer positivement ou négativement la stabilisation de la matière organique du sol. Parmi les traits architecturaux ciblés par les auteurs, la distribution de la profondeur des racines est le trait le plus important pour contrôler le stockage et la stabilisation du carbone dans le sol. De plus, la longueur spécifique des

racines et les associations mycorhiziennes contribuent considérablement à la structuration du sol (Poirier et al., 2018). Plusieurs études plus récentes ont confirmé et élargi ces résultats en montrant que les traits racinaires jouent un rôle majeur dans la stabilisation du carbone du sol (Kramer-Walter et al., 2020; Angst et al., 2021).

D'autres caractéristiques favorisent la stabilisation du carbone par interaction avec les minéraux. C'est le cas des traits chimiques, comme la concentration en azote et en composés solubles des racines, tandis que la concentration en lignine des racines semble avoir un effet inverse (Poirier et al., 2018). La lignine est une molécule récalcitrante qui ne peut être décomposée que par des microorganismes spécifiques (champignons) (Preston et Trofymow, 2015). Par ailleurs, les traits morphologiques couramment mesurés, tels que la longueur et le diamètre radiculaires spécifiques, sont aussi liés aux mécanismes de stabilisation (Preston, 2015).

1.2.4 Pratiques culturales en céréaliculture

Tout d'abord, il faut savoir que la culture du blé représente la principale culture au Canada et la première source de gains d'exportation parmi tous les produits agricoles du pays (Agriculture and Agri-Food Canada, 2024). D'ailleurs, le Canada est l'un des cinq plus grands exportateurs de blé au monde et le premier producteur mondial de blé de mouture riche en protéines (MAPAQ, 2017). Toutefois, le pays est également l'un des principaux exportateurs d'orge de brasserie, en raison de sa forte teneur en extrait fermentescible et de sa pureté variétale garantie (Agriculture and Agri-Food Canada, 2022).

Les techniques agricoles ne cessent d'évoluer, de sorte que ce qui est considéré comme une méthode typique à un moment donné pourrait ne pas nécessairement l'être quelques années plus tard. L'agriculture biologique consiste en une agriculture de haute qualité et repose sur des pratiques ciblées ainsi qu'un cahier des charges précis. Le critère à retenir est le maintien de la viabilité, et les pratiques pourraient donc varier d'une entreprise agricole à une autre, étant donné la situation particulière de chacune. Depuis quelques années, les produits phytosanitaires sont au cœur des discussions, d'une part à cause de leur présence dans le produit final et, d'autre part,

à cause de leur efficacité remise en question dans la lutte contre certaines maladies et ravageurs (Thélémaque, 2014). Si l'utilisation d'herbicides foliaires systémiques plus efficaces a permis de faire régresser certaines infestations, l'augmentation de diverses adventices (notamment *Malva sylvestris*, *Geranium spp.* ou *Scabiosa atropurpurea*) suite aux applications répétées de glyphosate a mis en évidence que les communautés adventices continuent de se modifier sous la pression des nouveaux filtres imposés par l'humain (Maillet et al., 2001). Aujourd'hui, la palette d'herbicides disponibles pour les céréaliculteurs se réduit progressivement, notamment en raison de contraintes réglementaires et environnementales accrues.

Parmi les alternatives raisonnées, on trouve le recours à l'installation d'un enherbement, qui consiste à semer une culture intercalaire ou plusieurs espèces dans le même champ que la culture principale (Dyck et al., 1993). Cette pratique recouvre une grande diversité de situations qui se définissent à la fois par leur nature et leur durée. On distingue généralement des espèces implantées avec ou juste après le semis de la culture principale. À l'échelle spatiale, différentes études ont mis en avant l'intérêt de l'analyse et de la compréhension des effets des différents couverts semés sur les cultures annuelles (Tribouillois et al., 2015). Une bonne connaissance des parcelles et de leur aptitude à être enherbées doit être établie au préalable pour bien choisir le type d'implantation de l'enherbement (Agreste, 2012). Et à l'échelle temporelle, parallèlement au choix du positionnement spatial des enherbements, le céréaliculteur pourra aussi moduler la durée et choisir la période de couverture du sol.

L'adoption des légumineuses comme culture intercalaire en enherbement constitue une pratique largement étudiée en céréaliculture biologique en raison de ses effets sur la gestion des adventices et le cycle de l'azote. Hartl (1989) a montré que l'introduction de trèfles en sous-semis dans des systèmes de blé d'hiver biologique permet de réduire la pression des adventices tout en influençant le rendement de la culture principale. Dans d'autres systèmes aussi céréales-légumineuses, on trouve des recherches qui ont également démontré que les légumineuses en sous-semis influencent fortement les dynamiques de l'azote du sol, avec des effets variables sur la disponibilité en nutriments et les performances des cultures céréalières

(Hauggaard-Nielsen et al., 2012). Ces résultats soulignent le rôle des légumineuses comme levier agroécologique important pour améliorer la durabilité des systèmes céréaliers biologiques.

Cependant, les différentes pratiques de gestion des enherbements en cultures annuelles doivent être adaptées selon la parcelle, le type de sol, la flore adventice présente, les saisons et les objectifs de l'agriculteur (Nichols et al., 2015). Prenons le cas, de l'implantation des légumineuses utilisées comme culture de couverture en production céréalière biologique dans le but d'apporter de l'azote et du carbone au sol, lutter contre les adventices et accroître les rendements (Verret et al., 2017; Vrignon-Brenas et al., 2018; Lavergne et al., 2021; Bourgeois et al., 2022; Gardarin et al., 2022). Dans ce cas, il existe un compromis dans la capacité à produire une biomasse abondante pour combattre les adventices, d'une part, et fournir une biomasse riche en azote pouvant accroître les rendements, d'autre part, et cela varie grandement d'une espèce à l'autre (Finney et al., 2017). En outre, le moment durant lequel les cultures de couverture de légumineuses sont implantées affecte les services qu'elles apportent en production cérésières. En effet, lorsque les légumineuses sont semées en même temps que les céréales, on parle d'implantation synchrone (Gardarin et al., 2022). Plus tard dans la saison, les semis sont qualifiés d'asynchrones : les légumineuses intercalaires sont alors implantées après les céréales, lorsque ces dernières ont atteint un certain stade de développement (Gardarin et al., 2022 ; Vanasse et al., 2022). Dans ce dernier cas, les légumineuses intercalaires risquent de moins compétitionner les céréales et affecter négativement les rendements, mais leur période de croissance sera moins longue et leur capacité à compétitionner les adventices pourrait être limitée (Verret et al., 2017; Gardarin et al., 2022). Le manque de connaissances qui en découle limite notre capacité à outiller les entreprises agricoles pour déterminer quelles légumineuses intercalaires planter et à quel moment le faire pour produire une biomasse abondante, apporter de l'N et du C, lutter contre les adventices et potentiellement accroître les rendements.

1.2.5 Rôle de l'enherbement dans la lutte contre les adventices

Les cultures intercalaires sont des cultures de couverture protégeant le sol durant la croissance de la culture principale. Elles peuvent donc être semées avant l'émergence de la culture principale ou en cours de saison. Les cultures recommandées seront souvent moins compétitives par rapport à la culture principale, mais elles couvriront bien le sol ; il en résulte un sol mieux couvert, ce qui limite l'établissement des adventices (Delabays, 2002). Un enherbement laisse moins de chances aux adventices de s'établir. Certaines plantes de couverture ont également des effets allélopathiques. Cette capacité à étouffer et à entrer en concurrence avec les espèces indésirables dépend largement de l'association des végétaux cultivés ainsi que de la densité de semis. Ainsi, cette pratique d'enherbement peut être une alternative de lutte contre les adventices lorsqu'on cultive des espèces peu concurrentielles. Par exemple, Mohler et Liebman (1987) ont démontré que la monoculture des pois ou celle de l'orge produisait plus d'aventices que la culture intercalaire d'orge et de pois. Dans une autre étude au Manitoba, Pridham et al. (2006) ont constaté qu'à la suite de diverses associations de cultures telles que le blé avec le lin ou encore la vesce velue, les cultures intercalaires qui couvraient le sol au printemps étaient celles qui éliminaient le plus grand nombre d'aventices. Toutefois, les associations les moins concurrentielles sont celles qui mettent le plus de temps à s'installer, comme c'est le cas de la vesce velue (Pridham et al., 2006).

Dans les systèmes céréaliers, les légumineuses intercalaires influencent également la dynamique de compétition avec les adventices, par conséquent ceci se traduit par une réduction de leur biomasse et une amélioration des performances des cultures principales. Ces effets se répercutent directement sur les rendements, qui constituent un indicateur intégré de la réussite des interactions plante–environnement (Teasdale, 1996 ; Bedoussac et al., 2015)

1.2.6 Impact de l'enherbement sur le fonctionnement du sol

Les scientifiques ont démontré que le réchauffement climatique est dû en particulier à l'activité humaine, en relation avec les progrès de l'industrialisation (Lefèvre et al., 2017). Avec le changement climatique, la dégradation des terres, les faibles niveaux

de carbone organique dans le sol, l'érosion et la perte de biodiversité, les sols sont devenus l'une des ressources les plus vulnérables du monde. Or, il faut savoir que le sol est le plus grand réservoir de carbone de la biosphère après les océans ; il contient plus de carbone que l'atmosphère et la végétation terrestre réunies (Belliard et al., 2018). Le choix des pratiques culturales est donc crucial pour limiter la dégradation du sol et préserver, voire augmenter, les quantités de carbone qui y sont stockées. En particulier, le mode de travail du sol est important car il peut influencer la dynamique de la structure, la porosité et la matière organique, agissant ainsi sur la productivité (Bouthier et al., 2014). Ce mode de travail affecte également les organismes du sol, soit en les tuant, soit en les exposant au risque de prédation (Roger-Estrade et al., 2010). Cela peut conduire à une diminution de la diversité des organismes dans les sols agricoles, cette diminution étant plus ou moins importante selon la fréquence et l'intensité du travail du sol (Altieri, 1999).

Cependant, face à ces contraintes agronomiques, plusieurs études ont mis en évidence la capacité de l'enherbement à répondre à ces problèmes (Benoit, 2010). En maîtrisant correctement les espèces intercalaires, il est possible d'améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. La présence d'un couvert végétal favorise la création de macropores dans le sol, ce qui améliore la qualité physique de ce dernier (Chen et Weil, 2010). Certaines espèces possèdent en effet une meilleure capacité de pénétration dans le sol grâce à la croissance de leurs racines, offrant ainsi un milieu riche en activité biologique (Rosolem et al., 2002).

La biomasse tant aérienne que racinaire, des cultures est capable ainsi à contribuer significativement à l'amélioration de la structure du sol, à la séquestration du carbone, à la réduction de l'érosion et au soutien à la biodiversité microbienne (Gaba et al., 2018; Berg et al., 2020 ; Jiang et al., 2020). Hauggaard-Nielsen et al. (2005) ont montré que les interactions racinaires dans les systèmes de cultures intercalaires peuvent être facilitatrices, améliorant l'acquisition des ressources, notamment l'azote, et contribuant ainsi à une meilleure efficacité d'utilisation des nutriments, avec des effets potentiels sur la productivité des systèmes. Des récents travaux ont révélé, le rôle des racines des cultures intercalaires dans l'accumulation du carbone organique,

favorisant la structuration du sol et la rétention de matière organique stable (Jones et al., 2023 ; Pisarčík et al., 2024). Néanmoins, ces études restent encore limitées et cet aspect racinaire demeure peu exploré (Materechera et al., 1991). Selon Chen et Weil (2010), la culture du maïs, grâce à son enracinement, permet de recoloniser les galeries laissées par une culture précédente de légumineuses, comme la luzerne. De plus, la décomposition des racines laisserait un réseau de galeries que les végétaux suivants pourraient utiliser. L'enherbement, en tant que culture de couverture, pourrait donc favoriser un milieu actif pour les microorganismes du sol, mobiliser les éléments fertilisants de la surface vers les horizons profonds et assurer une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.

1.3 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif général de de cette thèse est d'étudier l'impact de l'introduction de légumineuses intercalaires dans les cultures céréalières sur la lutte contre les adventices, les rendements, la biomasse et la composition chimique des plantes, ainsi que les propriétés physiques et la fertilité du sol dans les régions de l'Abitibi et du Témiscamingue entre 2019 et 2020. Dans l'ultime but, de fournir des recommandations pratiques et adaptées pour une gestion optimale de l'enherbement en agriculture biologique, dans une perspective de durabilité et de résilience des systèmes de production céréalière. Les trois objectifs spécifiques, détaillés ci-dessous, correspondent chacun à un article dans le cadre de cette thèse.

1.3.1 Objectif spécifique 1

Le premier objectif était d'évaluer l'impact de la culture intercalaire de trois espèces de légumineuses (i.e., trèfle blanc et incarnat ainsi que mélilot jaune) avec une culture d'avoine biologique sur la composition et la diversité des adventices pendant deux années consécutives en se basant sur deux approches : l'une fondée sur l'analyse taxonomique de la flore et l'autre sur l'analyse des traits fonctionnels des plantes. Cet objectif était évalué uniquement dans la région de l'Abitibi.

Hypothèse 1.1

En premier, nous émettons l'hypothèse que la présence de cultures de légumineuses modifierait la composition des communautés adventices en comparaison aux parcelles témoins sans cultures de couverture. La composition et la diversité des communautés d'adventices devraient évoluer entre 2019 et 2020 de manière différente selon les traitements d'enherbement. Pour tester cette hypothèse, nous avons mesuré des indices de diversité taxonomique. Dans le cas des données sur la composition des espèces, certaines sont souvent écologiquement semblables. Par exemple, des espèces préfèrent se développer dans un habitat humide plutôt que dans un habitat sec. Cela signifie que l'ensemble de données contient plusieurs variables redondantes.

Hypothèse 1.2

Nous avons formulé l'hypothèse que les espèces et les communautés d'adventices auraient des stratégies diversifiées en fonction des traitements d'enherbement. Cela a été évalué en comparant les effets des traitements d'enherbement sur les valeurs des traits individuels mesurés au niveau de l'espèce, ainsi que sur les valeurs agrégées des traits calculées au niveau de la communauté. Pour un trait donné, une stratégie a été considérée comme diversifiée si les valeurs de traits différaient en fonction des traitements d'enherbement.

1.3.2 Objectif spécifique 2

En second lieu, notre objectif était d'évaluer l'impact de quatre espèces de légumineuses intercalaires (i.e., trèfle rouge, blanc et incarnat ainsi que méliot jaune) implantées au semis et au tallage en production d'avoine et de blé biologiques sur les rendements des cultures, la biomasse aérienne des adventices et celle des légumineuses, la concentration en azote et en carbone de la biomasse aérienne des légumineuses et les quantités d'azote et de carbone apportées par celle-ci. Cet objectif a été évalué en Abitibi et au Témiscamingue.

Pour ce faire, nous avons mesuré les quantités de biomasse produites et en avons évalué la composition chimique. Nous avons pu identifier quelles méthodes

d'implantation optimisent l'apport de nutriments et soutiennent la productivité des cultures, tout en réduisant la compétition avec les céréales.

Hypothèse 2.1

Nous avons émis l'hypothèse que la présence des légumineuses intercalaires devrait influencer positivement les rendements et diminuer la quantité de biomasse produite par les adventices comparativement au traitement témoin.

Hypothèse 2.2

Nous nous attendons à ce que le trèfle incarnat produise davantage de biomasse aérienne et par conséquent, réduise celle produite par les adventices comparativement aux autres légumineuses intercalaires.

Hypothèse 2.3

Nous nous attendons à ce que la biomasse des trèfles blanc et rouge soit plus riche en azote que celles du trèfle incarnat et du mélilot jaune et conséquemment apporte plus d'azote et de carbone au sol. Ainsi, l'implantation des légumineuses au semis devrait permettre une meilleure installation des intercalaires, conduisant à une production de biomasse aérienne et des apports d'azote et de carbone plus importants que l'implantation au tallage.

1.3.3 Objectif spécifique 3

Finalement, l'objectif du dernier chapitre était de déterminer comment les différentes modalités d'enherbement affectaient certaines propriétés physiques et chimiques du sol. Cet objectif a été évalué en Abitibi et au Témiscamingue. Nous avons évalué des paramètres indicateurs de l'état de la structure et de la compaction du sol, ainsi que de la fertilité, de la qualité et de la quantité de matière organique. Nous avons comparé les résultats entre les deux sites d'étude afin d'évaluer si les effets des traitements différaient.

Hypothèse 3.1

Nous avons supposé en comparaison au témoin sans enherbement, que les espèces intercalaires améliorent les propriétés physiques et chimiques du sol.

Hypothèse 3.2

Nous nous attendons à ce que le trèfle incarnat optimise davantage la qualité du sol, notamment en améliorant la cohésion des agrégats que les autres traitements de légumineuses intercalaires.

1.4 Méthodologie générale

Zone d'étude

L'étude a été réalisée dans deux territoires différents. Le premier site était situé en Abitibi-Ouest dans la municipalité de Poularies (48°39'41.5"N; 79°01'03.8"O) dans un champ où une culture d'avoine fût implantée durant les deux années de l'expérience. Le climat est de type continental froid et humide à été tempéré, ce qui correspond à la catégorie Dfb selon la classification de Köppen (Peel et al., 2007). Durant cette période, les températures moyennes ont varié d'environ 6,9 à 19,7 °C entre mai et septembre. Les précipitations sont modérées, oscillant entre 41 et 133 mm par mois (Environment and Climate Change Canada, 2020). Le site d'étude a été implanté sur un sol de type argile lourde de la série Roquemaure. Les sols de cette série sont caractérisés par un mauvais drainage, contiennent typiquement ~900, ~100 et ~0 g kg⁻¹ d'argile (<2 µm), de limon (2-50 µm) et de sable (50-2000 µm), respectivement, dans l'horizon superficiel (i.e., 0-30 cm de profondeur), et sont classés comme des Gleysols humiques d'après le Système canadien de classification des sols (Rompré et Carrier, 1997 ; Groupe de travail sur la classification des sols, 2002).

Le deuxième site était situé à Laverlochère (Témiscamingue, Québec, Canada ; 47°25'35" N, 79°18'27" O), où une culture de blé biologique a été conduite durant les deux années de l'étude. Le climat est de type continental humide et classé Dfb selon la classification de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Le sol est caractérisé par un horizon d'accumulation d'argile dans le sous-sol, généralement appelé horizon Bt (Rompré et Carrier, 1997). Les concentrations en N et en C du sol et la masse

volumique apparente (MVA) du sol entre 0-15 cm de profondeur étaient respectivement de 4.29 g N kg⁻¹, 64.8 g C kg⁻¹ et 1.27 g cm⁻³. Le champ fût divisé en deux blocs distincts au sein desquels les quatre traitements furent implantés aléatoirement dans quatre parcelles distinctes d'environ 9 m x 125 m chacune. Deux cadrats de 1 m x 1 m ont été disposés arbitrairement à au moins 60 m l'un de l'autre dans chaque parcelle et chacun des blocs, de manière à former quatre unités expérimentales indépendantes (i.e., quatre répétitions) pour chacun des traitements. Le dispositif expérimental totalise donc 16 unités expérimentales : 4 modalités de légumineuses x 2 cadrats par parcelle x 2 blocs. Le même dispositif fût implanté au même endroit en 2019 et 2020.

2. DO INTERCROPPED LEGUMES ALTER WEED COMMUNITIES IN ORGANIC FIELD CROPS? A TAXONOMIC AND FUNCTIONAL PERSPECTIVE

Insaf Chida¹, Noura Ziadi², et Vincent Poirier^{1*}

¹Agriculture and Agri-Food Research Institute, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Notre-Dame-du-Nord, QC J0Z 3B0, Canada

²Quebec Research and Development Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Québec, QC G1V 2J3, Canada

*Author to whom correspondence should be addressed.

Agronomy 2026, 16(7), 708; <https://doi.org/10.3390/agronomy16070708>

Submission received: 31 October 2025 / Revised: 17 February 2026 / Accepted: 3 March 2026 / Published: 27 March 2026

2.1 Résumé

La transition de la production traditionnelle vers la production biologique gagne en popularité dans le monde entier, mais elle pose des défis importants, notamment en matière de gestion des mauvaises herbes. Nous avons évalué l'impact des légumineuses semées comme cultures de couverture dans un système de culture intercalaire synchrone (SI) avec de l'avoine biologique (*Avena sativa*) comme culture principale sur les communautés de mauvaises herbes. Un dispositif en parcelles divisées a été mis en place dans une ferme à Poularies (Québec, Canada) afin de comparer *Melilotus officinalis*, *Trifolium incarnatum*, *Trifolium repens* et un témoin sans légumineuses pendant deux ans (2019-2020). Nous avons déterminé la composition botanique, calculé les indices de diversité et mesuré les traits fonctionnels des plantes. La richesse en espèces était similaire ($S = 5,5 \pm 0,4$) dans tous les traitements en 2019, mais plus élevée dans le contrôle ($S = 12,2 \pm 2,6$) et plus faible ($S = 6,0 \pm 1,2$) sous *T. incarnatum* en 2020. La diversité de Shannon était plus faible en 2019 ($H' = 1,49 \pm 0,07$) qu'en 2020 ($H' = 1,99 \pm 0,04$), et plus élevée dans le groupe témoin ($H' = 1,87 \pm 0,05$) que sous *T. incarnatum* ($H' = 1,46 \pm 0,04$). Les mauvaises herbes sous *T. incarnatum* avaient une surface foliaire spécifique élevée et une stratégie d'acquisition de ressources, tandis que celles du contrôle avaient une teneur en matière sèche foliaire plus élevée et une stratégie de conservation des ressources.

Notre étude apporte des résultats novateurs sur l'utilisation des légumineuses dans les systèmes SI pour lutter contre les mauvaises herbes. L'utilisation de *T. incarnatum* dans un système SI avec de l'avoine s'est avérée la plus efficace pour couvrir le sol, lutter contre les mauvaises herbes et réduire leur abondance et leur diversité, mais cette espèce et les mauvaises herbes envahissantes utilisées dans ce traitement pouvaient entrer en concurrence avec la culture principale. Des recherches futures devraient évaluer la quantité et la qualité des rendements afin de compléter cette étude écologique et de formuler des recommandations agronomiques appropriées. Nos résultats pourraient fournir aux agronomes et aux agriculteurs des indications sur le niveau de concurrence exercé par les mauvaises herbes sur le système de culture en fonction du traitement SI.

Mots-clés : Espèces de mauvaises herbes ; Cultures de couverture légumineuses ; Culture intercalaire synchrone ; Avoine biologique ; Analyse taxonomique ; Caractères fonctionnels ; Agroécologie.

2.2 Abstract

Transitioning from traditional to organic production is gaining popularity worldwide with significant challenges including weed management. We evaluated how legumes sown as cover crops in a synchronous intercropping (SI) system with organic oat (*Avena sativa*) as the main crop impact weed communities. A split-plot design was set up on a farm in Poularies (Quebec, Canada) to compare *Melilotus officinalis*, *Trifolium incarnatum*, *Trifolium repens* and a control without legumes for two years (2019-2020). We determined the botanical composition, calculated diversity indices, and measured plant functional traits. Species richness was similar ($S = 5.5 \pm 0.4$) across treatments in 2019, but higher in the control ($S = 12.2 \pm 2.6$) and lower ($S = 6.0 \pm 1.2$) under *T. incarnatum* in 2020. Shannon diversity was lower in 2019 ($H' = 1.49 \pm 0.07$) than in 2020 ($H' = 1.99 \pm 0.04$), and higher under the control ($H' = 1.87 \pm 0.05$) than under *T. incarnatum* ($H' = 1.46 \pm 0.04$). Weeds under *T. incarnatum* had a high specific leaf area and a resource-acquisition strategy, while those in the control had a higher leaf dry matter content and a resource-conservation strategy. Our study brings novel results on the use of legumes in SI systems to control weeds. Using *T. incarnatum* in a SI system with oat had the greatest capacity to cover the ground, control weeds and reduce their diversity, but this species and the acquisitive weeds in this treatment could compete with the main crop. Future research should evaluate the quantity and quality of yields to complete this ecological study and give appropriate agronomic recommendations. Our results could provide agronomists and farmers indications on the level of competition weeds exert on cropping system depending on the SI treatment.

Keywords: Weed species; Legume cover crops; Synchronous intercropping; Organic oats; Taxonomic analysis; Functional traits; Agroecology.

2.3 Introduction

Organic farming has experienced unprecedented growth worldwide in the last years, covering over 96 million ha and representing now 2.0 % of the world's agricultural land (Willer et al., 2025). In 2023, Canada ranked 11th in the world in terms of farmland under organic management (Willer et al., 2025). The 1.4 million ha of organic field crops grown make up around 4.4% of the 31.6 million hectares seeded to field crops in Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2025). Organic field crop production is based on sustainable, environmentally friendly practices aimed at restricting the use of synthetic inputs such as pest control products and chemical fertilizers (Reganold and Wachter, 2016). Organic farming can play a major role in establishing sustainable agricultural systems, but no single approach can provide food security for the entire planet (Reganold and Wachter, 2016). Indeed, the organic production method faces major challenges, particularly in terms of weed management (Halde et al., 2017).

Unlike conventional agriculture, where weed management relies heavily on synthetic inputs, organic agriculture favors alternative control strategies that require an integrated approach combining cultural practices and agronomic innovations (Gaba et al., 2014). Mechanical tillage, involving weeding and plowing, is a common weed management method (Reboud et al., 2022). However, it is energy-intensive and requires multiple passes of machinery, which can compact the soil. Crop rotation is another effective method because it disrupts the life cycle of weeds and reduces their presence (MacLaren et al., 2020; Singh et al., 2022). However, the effects of this approach are only visible after several growing seasons. In order to effectively control weeds in organic field crops, it is necessary to find a method that protects the soil and is fast and effective.

Cover crops, particularly legumes, are emerging as a sustainable weed control solution in organic field crops throughout the world. The growth of legumes sown as cover crops accelerates canopy closure, reducing light availability for weeds and limiting their establishment and growth (Liebman and Dyck, 1993; Verret et al., 2017). In addition to helping suppress weeds, legume cover crops can increase biodiversity

and improve the soil's physical and chemical properties (Vanasse et al., 2022). They boost the amount of nitrogen and organic matter in the soil while increasing biological activity (Abad et al., 2021), help to improve its structure, encourage water infiltration, and limit soil loss through erosion (Garcia et al., 2018; Smith et al., 2023). However, the capacity of the legume cover crops to control weeds and provide other ecosystem services can vary depending on the species and the way they are sown within the main crop. This is particularly the case in regions of the world with a cool, humid continental climate and hot summers, where only one growing season is possible.

Intercropping legumes with field crops can be done in the spring at the same time as the cereal crop is sown, a practice known as synchronous intercropping (SI) (Gardarin et al., 2022). The success of this practice, however, depends on climatic conditions, and the species chosen have to grow slowly so as not to harm the main crop (Vanasse et al., 2022). The use of legumes in SI systems could be a good strategy, as they compete little with cereals thanks to their ability to fix atmospheric nitrogen (Verret et al., 2017). Studies have shown that *T. repens* can modify plant-plant interactions and alter the dynamics of weed communities (Gerhards, 2018). *M. officinalis* offers little competition to early growing weeds, has a low tolerance for poorly drained soils, but tends to be heat tolerant (Vanasse et al., 2022). In contrast, *T. incarnatum* is adapted to a cool, humid climate and could produce high biomass when intercropped (Vanasse et al., 2022). *T. repens*, *T. incarnatum*, and *M. officinalis* are among the legumes that can be used as intercrops in organic field crops. These species are commonly recommended as cover crops in cereal production in a cool, humid continental climate such as in Eastern Canada (Vanasse et al., 2022). However, their impact on weeds remains poorly understood, particularly when they are used in a SI system where oats (*A. sativa*) is the main crop. Oats are the cereal of choice in cool and humid continental climates and one of the most important crops worldwide (Zhang et al., 2023; FAO, 2025); we thus need to understand how legumes used in a SI system can limit weed infestation and benefit oat production.

The nature of the sown cover crops directly influences the dynamics of weed communities (Damour et al., 2015), particularly the richness and diversity of their

composition (Tribouillois et al., 2015). Flora communities can be studied using a number of indices, including the species richness index, which corresponds to the total number of species present (Brown et al., 2007), and the Shannon diversity index, which also takes into account the distribution of individuals among these species (Spellerberg and Fedor 2003). These indices enable us to quantify the biodiversity of plant communities from a taxonomic viewpoint, but do not allow us to study their functions from an ecological viewpoint. Unlike the taxonomic approach, the functional approach analyzes the ecological roles and interactions between species within a community (Violle et al., 2007). Traits such as specific leaf area (SLA), leaf dry matter content (LDMC), and plant height provide information about competition and coexistence processes (Díaz et al., 2016). A study of species' functional traits could facilitate understanding of interactions between legumes and weeds, particularly in terms of competition for resources (Violle et al., 2007). The functional approach could thus help to optimize cover crop management because it is based on the study of resource acquisition and conservation strategies specific to each plant (Kazakou et al., 2016). However, there remains a lack of comprehension on the current application of functional traits in weed management. Indeed, very few studies take a taxonomic and functional perspective at weed management practices in organic field crops, and virtually no studies used such approach to investigate weed communities in oat production under cool and humid climatic conditions. By doing so, this novel work aims at deepening our understanding of weed population dynamics in the context of organic farming.

In this study, we used a dual approach (i.e., both taxonomic and functional) to gain complementary knowledge on the effect of legumes used in a SI system with oats on the abundance and diversity of weed species, on the one hand, and on their functional traits and growth strategies, on the other. The main objectives of this study were to evaluate the impact of three legume species intercropped synchronously with an organic oat crop on (1) the botanical composition of weeds, (2) the richness and diversity of plant communities, and (3) the functional traits of weed species and communities, over two consecutive years. Our first hypothesis is that the presence of

intercropped legumes will modify the composition of weed communities compared with control plots without legumes. Our second hypothesis is that the diversity and composition of weed communities evolve differently between 2019 and 2020, depending on the intercropping treatments applied. Our third hypothesis is that the growth strategies of weeds will vary depending on the intercropping treatments.

2.4 Materials and Methods

2.4.1 Characteristics of the study site

The study site was located in Poularies (48°39'41.5"N; 79°01'03.8"W), in the Abitibi-Ouest regional county municipality of Quebec, Canada. Organic oats had already been planted in the field in 2019, and the same crop was planted in 2020. The region has a cold, humid continental climate with warm summers and mean annual temperature and precipitations of 1.0°C and 985 mm, respectively, based on the 1981-2010 climate normals at the Mont-Brun station (Environment and Climate Change Canada 2025). This corresponds to the Köppen classification Dfb (Peel et al., 2007). The meteorological data from the two growing seasons are presented in Table 2, as well as those associated with the historical monthly averages between 1981 and 2010 for comparison purposes. The study site is located on a heavy clay soil in the Roquemaure series. The soils in this series are characterized by poor drainage and typically contain ~900, ~100, and ~0 g kg⁻¹ of clay (<2 µm), silt (2–50 µm), and sand (50–2000 µm), respectively, in the surface layer and are classified as Humic Gleysols in the Canadian System of Soil Classification (Rompre and Carrier, 1997; Canadian Soil Classification Working Group, 2002). The percentage of soil organic matter, the C and N concentrations and the bulk density of the soil at 0-15 cm depth were 7.7%, 44.6 g C kg⁻¹, 3.62 g N kg⁻¹, and 1.26 g cm⁻³, respectively. The region's topography is relatively flat, as the site is located on a vast clay plain at around 300 m altitude (Rompre and Carrier, 1997).

Table 2 Weather data during the 2019 and 2020 growing seasons in Poularies

Months	Mean temperature (°C)			Precipitation (mm)			Days with precipitation (no.)			Growing degree- days (base 5°C) (no.)		
	2019*	2020*	Avg#	2019*	2020*	Avg#	2019*	2020*	Avg#	2019*	2020*	Avg#
May	6.9	7.5	9.3	56	41	76	11	11	nd	63	147	134
June	14.0	15.5	14.3	133	84	88	12	13	nd	249	300	280
July	18.8	19.7	16.9	65	125	100	9	16	nd	397	441	368
August	15.7	15.4	15.3	91	61	97	14	11	nd	318	309	320
September	11.1	10.6	10.2	95	114	108	13	19	nd	163	166	154
October	5.3	1.6	4.0	97	127	82	16	20	nd	42	13	8

† Data from the weather station located in Palmarolle, approximately 15 km from Poularies. *Data obtained from the Agrométéo Québec website (http://www.agrometeo.org/indices/mcd_estim). # Average for the 1981–2010 period obtained from the Agrométéo Québec website (<http://www.agrometeo.org/indices/category/general#>).

2.4.2 Description of the experimental design

A split-plot experimental design was set up under actual on-farm conditions in an organic oat crop. Four treatment were tested at the main plot level: three intercropped legumes – (1) *M. officinalis*, (2) *T. incarnatum*, and (3) *T. repens* – and (4) a control with no legumes, resulting in a spontaneous weed cover. These species were selected since they are frequently used as legume cover crops in Quebec, Canada (Vanasse et al. 2022). The field was divided into two distinct blocks within which the four treatments were randomly applied in four separate plots of approximately 9 m × 125 m each. Two 1 m × 1 m quadrats were arbitrarily placed at least 60 m apart in each plot and each block so as to form four independent experimental units (i.e., repetitions) for each treatment. The experimental design thus consisted of 32 experimental units: 4 legume treatments × 2 quadrats per plot × 2 blocks × 2 years. The same design was used at the same location in 2019 and 2020, and the year factor was considered at the subplot level. The *T. repens*, *T. incarnatum*, and *M. officinalis* were sown at rates of 6, 15, and 5 kg ha⁻¹ according to local recommendations, respectively, using a John Deere cereal seeder. The rows of oats were spaced 16.5 cm apart. The sowing rate for oats was 220 kg ha⁻¹, oats and legumes were sown at the same time (i.e.,

synchronous intercropping) in early June 2019 and 2020. No organic fertilization, irrigation nor mechanical weed control were used.

2.4.3 Botanical survey and composition

In each plot, 1 m x 1 m wire frame quadrats were laid out to include the five oat rows in the center of the plot and exclude those at the lateral ends in order to avoid edge effects. A botanical survey of all individuals in the quadrat was carried out in the field in mid-July, about seven weeks after seeding, to identify them to species level, including the main crop, intercropped legumes sown, and weeds. Species were identified in the field, first using the Pl@ntNet mobile application. This platform uses machine learning to identify RGB images with high accuracy and is widely used by scientists and citizens to identify plant species through pictures of their organs (Joly et al., 2016; Neto-Bradley et al., 2025). Then, species identity was confirmed using the reference books Flora of North America: North of Mexico (Flora of North America Editorial Committee, 1993; Flora of North America Editorial Committee, 2007) to validate the identification of all weeds. The total botanical composition was calculated from the percentage cover of all the species found in the quadrats. This approach makes it possible to evaluate the structure of the plant cover, including the main crop, weeds, and sown intercrops (Peratoner and Pötsch, 2019). It was calculated using the following equation:

$$\textbf{Total botanical composition (\%)} = \left(\frac{\textit{Cover of a species}}{\textit{Total cover of all species}} \right) \times 100 \quad \textbf{(Eq. 1)}$$

Species cover was determined according to Daubenmire (1959) by making a direct visual estimate of coverage in order to determine the proportion of the area occupied by oats, intercropped legumes, and weeds so the sum of the percentages equals 100. The cover percentages were determined during the plants' active growing season in the second half of July, approximately seven weeks after sowing.

2.4.4 Species richness and diversity of communities

The number of species found in each quadrat (oats, sown legumes, and weeds) was measured to assess the species richness of the plant communities per unit area (S, number of species per m²) (Spellerberg and Fedor, 2003; Peratoner and Pötsch, 2019; Garnier et al., 2016). Diversity of the plant communities was determined by calculating the Shannon diversity index (H') (Spellerberg and Fedor 2003; Shannon and Weaver 1949) using the following equation:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2 p_i \quad (\text{Eq. 2})$$

where S is the total number of species and p_i is the relative abundance of species i. The relative abundance of each species is calculated by dividing the number of individuals in that species by the total number of individuals in all the species present. This method provides a percentage representation of each species' contribution, thus playing an essential role in the assessment of diversity within the plant community (Spellerberg and Fedor, 2003). A higher value in this index reflects greater diversity.

2.4.5 Functional traits of weed species and communities

Standardized protocols were used to measure traits (Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Pérez-Harguindeguy et al., 2016). In each of the quadrats, the traits of dominant weed species, i.e., those who made up at least 80% of the botanical composition, were measured (Grime et al., 1988; Laughlin 2014; Garnier et al., 2016). According to Garnier et al., (2016), the choice of species for trait measurements should be concentrated on the most abundant species to improve the identification of response traits to environmental gradients. The main crop and intercropped legumes were excluded from this calculation to focus the functional traits analysis solely on the weed communities. The botanical composition of weeds was calculated as follows:

$$\text{Weed botanical composition (\%)} = \left(\frac{\text{Cover of a weed species}}{\text{Total cover of all weed species}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

For each dominant weed species, seven individuals were selected for trait measurements in mid-July. These individuals were in the adult stage prior to the

reproductive stage and showed no apparent damage (e.g., herbivory). The actual vegetative height of the plants (i.e., the height reached by the outermost adult leaves, expressed in cm) and canopy area (i.e., the ellipse within which their foliage lies, expressed in cm²) were measured in the field, disturbing the existing vegetation as little as possible (Cornelissen et al., 2003; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Pérez-Harguindeguy et al., 2016). A tape measure was used to measure the height of the plants, from the base to the outermost adult leaves. The canopy area was calculated by measuring the area of the ellipse (A, cm²) formed by the foliage using the formula:

$$A = \frac{\pi \times L \times l}{4} \quad (\text{Eq. 4})$$

where L (cm) is the length of the major axis of the ellipse representing maximum foliage length, and l (cm) is the length of the minor axis representing maximum foliage width.

To measure leaf traits, a fully developed and intact leaf (or several leaves if they were very small) was manually removed and placed in a plastic container filled with distilled water. The rest of the individual was manually harvested at the base of the stem and placed in a plastic bag containing a moist paper towel. The samples were transported to the laboratory less than 12 h after sampling and left for a minimum of 6 h in the dark at low temperature (4 °C). The leaves were then weighed to determine their water-saturated fresh mass, scanned with an Epson Perfection v800 Photo scanner, and oven dried (60 °C) for 72 h before being weighed again to determine their dry mass. The scanned images were analyzed with ImageJ software (Schneider et al., 2012) to determine leaf area (LA, cm²) and specific leaf area (SLA, m² kg⁻¹). The leaf dry matter content (LDMC, mg g⁻¹) was calculated by dividing the dry mass of a leaf by its water-saturated fresh mass. To characterize the weed plant communities found in the quadrats, we measured the aggregated traits of these communities (i.e., Trait_{CWM}) using the equation adapted from Garnier et al., (2004):

$$\text{Trait}_{CWM} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \text{trait}_i \quad (\text{Eq. 5})$$

where S is the total number of species and p_i is the relative abundance of species i . The relative abundance of each species is calculated by dividing the number of individuals in that species by the total number of individuals in all the species present. This method provides a percentage representation of each species' contribution, thus playing an essential role in the assessment of diversity within the plant community (Spellerberg and Fedor, 2003). A higher value in this index reflects greater diversity.

2.4.6 Statistical analyses

The split plot statistical model was used to analyze the species richness index (S) and Shannon diversity index (H') data with the “legume” factors (4 levels) at the main plot level and the “year” factor (2 levels) at the subplot level. These factors and their interactions are the fixed terms in the model, while “block” and “block*legume” make up the random part of the model. In the presence of significant interactions between fixed factors, this model can be used to examine variations between levels of one factor as a function of the levels of the other. One of its major advantages is its ability to make comparisons by reducing the influence of variations between blocks. Model fitting was performed using the `lme` function in the `nlme` library in R, version 4.4.2 (R Core Team, 2025). The species richness index (S) was calculated using the `specnumber` function and the Shannon diversity index (H') was calculated using the `diversity` function, both from the `vegan` library.

The statistical model used to compare the five aggregated leaf traits of the weed communities (i.e., height, canopy area, LA, SLA, and LDMC) is similar to the one presented above, with the difference that 2019 and 2020 were analyzed separately. This difference is justified by the fact that the dominant weed species used to achieve 80% coverage differed between the two years; the composition of the weed communities is strongly influenced by year, which made it difficult to perform an analysis combining years without hiding some significant dynamics. Model validation was based on residual analysis and assessment of homogeneity of variances. Where necessary, the data underwent a Box-Cox transformation to ensure the normality of the variables. No outliers were removed. Where the analysis revealed a significant

effect of one factor, multiple comparisons were carried out using the Tukey correction, thus controlling for overall error. The differences between treatments and years were assessed by estimating the marginal means of treatment effects each year, obtained via the `emmeans` function of the `vegan` library. A redundancy analysis (RDA) was carried out to explore the relationship between aggregated leaf traits of the weed communities as responsible variables and intercropping treatments as explanatory variables. Weed species were also projected into the ordination to facilitate ecological interpretation of the relationships between traits and treatments. ANOVA tests were used to evaluate the results with 10 000 permutations to test the significance of the axes and explanatory variables. Lastly, a visual representation of the results was created in the form of a graph of the first two axes (RDA1 and RDA2) to provide a better understanding of the relationship between the different traits, treatments, and species, as well as the contribution of each axis to the total variance. All the statistical tests were performed at a significance level of $\alpha = 5\%$ and comparisons made with Tukey's test.

2.5 Results

2.5.1 Botanical surveys and composition

In total, 11 weed species were identified during botanical surveys carried out in 2019 (Table 3), the most frequent being *A. millefolium*, *D. carota*, *P. major*, *S. asper*, *T. officinale*, *U. urens*, and *V. sativa*. The last two species were the only two weeds found in all the treatments. In 2020, 26 weed species were identified, the most frequent being *E. repens*, *E. arvense*, *P. major*, *S. arvensis*, *S. asper*, *U. urens*, and *V. sativa* (Table 4). The species *E. repens*, *P. major*, and *V. sativa* were the only three weed species found in all the treatments in 2020. During the two years of experimentation, intercropping with *T. incarnatum* was the treatment in which weeds made up the smallest proportion of the total botanical composition (i.e., approximately 47% averaged across both years), while the *M. officinalis* treatment and the control resulted in the highest proportion of weeds (i.e., approximately 71% averaged across both years).

Table 3 Botanical composition in 2019 in organic oat plots with or without intercropped legumes

Species	Intercropped legume treatments				Family
	<i>M. officinalis</i> (%)	<i>T. incarnatum</i> (%)	<i>T. repens</i> (%)	Control (%)	
<i>Avena sativa</i>	15	18	25	38	Poaceae
<i>Melilotus officinalis</i>	10	0	0	0	Fabaceae
<i>Trifolium incarnatum</i>	0	35	0	0	Fabaceae
<i>Trifolium repens</i>	0	0	22	1	Fabaceae
<i>Achillea millefolium</i>	4	7*	10*	3	Asteraceae
<i>Daucus carota</i>	16*†	2	0	0	Apiaceae
<i>Elytrigia repens</i>	0	0	0	2	Poaceae
<i>Gernium molle</i>	0	2	1	1	Geraniaceae
<i>Picris ecoides</i>	0	0	1	0	Asteraceae
<i>Plantago major</i>	4	8*	5*	14*	Plantaginaceae
<i>Sonchus asper</i>	3	3	9*	11*	Asteraceae
<i>Taraxacum officinale</i>	16*	4*	4	9*	Asteraceae
<i>Urtica urens</i>	18*	11*	11*	10*	Urticaceae
<i>Veronica arvensis</i>	0	0	0	1	Plantaginaceae
<i>Vicia sativa</i>	14*	10*	12*	10*	Fabaceae
Total	100	100	100	100	

† In each intercropping treatment, weed species marked with an asterisk (*) are the dominant species

Table 4 Total botanical composition in 2020 in organic oat plots with or without intercropped legumes

Species	Intercropped legume treatments				Family
	<i>M. officinalis</i> (%)	<i>T. incarnatum</i> (%)	<i>T. repens</i> (%)	Control (%)	
<i>Avena sativa</i>	10	13	13	20	Poaceae
<i>Melilotus officinalis</i>	21	0	0	0	Fabaceae
<i>Trifolium incarnatum</i>	0	40	0	0	Fabaceae
<i>Trifolium repens</i>	0	0	25	0	Fabaceae
<i>Carduus pycnocephalus</i>	1	0	0	0	Asteraceae
<i>Centranthus calcitrapae</i>	0	1	0	0	Valerianaceae
<i>Convolvulus arvensis</i>	0	0	1	0	Convolvulaceae
<i>Crepis sancta</i>	0	2	1	1	Asteraceae
<i>Daucus carota</i>	0	0	0	1	Apiaceae
<i>Diplotaxis eruroides</i>	0	0	0	1	Brassicaceae
<i>Elymus repens</i>	10*†	10*	9*	15*	Poaceae
<i>Equisetum arvense</i>	0	4*	9*	3	Equisetaceae
<i>Erodium cicutarium</i>	0	1	0	0	Geraniaceae
<i>Erigeron sumatrensis</i>	0	1	0	0	Asteraceae
<i>Geranium rotundifolium</i>	1	0	0	0	Geraniaceae
<i>Medicago sp</i>	0	0	0	1	Fabaceae
<i>Plantago major</i>	13*	6*	11*	20*	Plantaginaceae
<i>Poa annua</i>	2	0	0	1	Poaceae
<i>Rumex pulcher</i>	0	0	0	1	Polygonaceae
<i>Sonchus arvensis</i>	6*	4*	0	7*	Asteraceae
<i>Sonchus asper</i>	24*	0	5*	0	Asteraceae
<i>Stellaria media</i>	1	0	5	0	Caryophyllaceae
<i>Urtica urens</i>	6*	12*	15*	16*	Urticaceae
<i>Veronica arvensis</i>	1	0	1	0	Plantaginaceae
<i>Veronica persica</i>	0	1	0	1	Plantaginaceae
<i>Vicia sativa</i>	1	5*	5*	11*	Fabaceae
<i>Vicia sp</i>	0	0	0	1	Fabaceae
<i>Vicia villosa</i>	1	0	0	0	Fabaceae
<i>Vulpia myuros</i>	1	0	0	0	Poaceae
<i>Vulpia sp</i>	1	0	0	0	Poaceae
Total	100	100	100	100	

† In each intercropping treatment, weed species identified with an asterisk (*) are the dominant species.

2.5.2 Species richness (S) and Shannon diversity (H')

Table 5 shows the ANOVA results for the effect of the legume intercropping treatment, the year, and their interactions on the species richness index and Shannon diversity index. The results reveal a significant interaction between treatment and year ($P = 0.0222$) on the species richness index, indicating that the effect of treatments varies from one year to the next. In 2019, the *T. incarnatum*, *T. repens*, and *M. officinalis* treatments and the control had a similar mean species richness (i.e., $S = 5.5 \pm 0.4$) and no significant differences were found between them. However, in 2020, there was a clearer hierarchy among the treatments, with the species richness of the control treatment (i.e., $S = 12.2 \pm 2.6$) significantly higher than that of the other treatments, while the species richness of *M. officinalis* and *T. repens* (i.e., $S = 8.5 \pm 1.5$) was significantly higher than that of the *T. incarnatum* treatment (i.e., $S = 6.0 \pm 1.2$), which was the lowest observed.

Our results also show that the intercropped legume treatment ($P = 0.0012$) and the year ($P < 0.0001$) have a significant impact on Shannon diversity (Table 5). The Shannon diversity indices under the *M. officinalis* and control treatments were similar and significantly higher than those of the other two treatments. It was ~10 % higher than under the *T. repens* treatment and ~25% higher than under the *T. incarnatum* treatment, which had the lowest Shannon diversity index (Figure 2). Lastly, the Shannon diversity index was ~33% higher in 2020 (i.e., $H' = 1.99 \pm 0.04$) than in 2019 (i.e., $H' = 1.49 \pm 0.07$). This shows that the communities' diversity increased in 2020.

Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for species richness and Shannon index as affected by the intercrop legume treatment, year, and their interaction

Term	Species richness (S)		Shannon index (H)	
	F-ratio	P-value	F-ratio	P-value
Treatment	1.913	0.2160	17.649	0.0012
Year	256.000	<0.0001	157.332	<0.0001
Treatment × Year	5.667	0.0222	2.045	0.1861

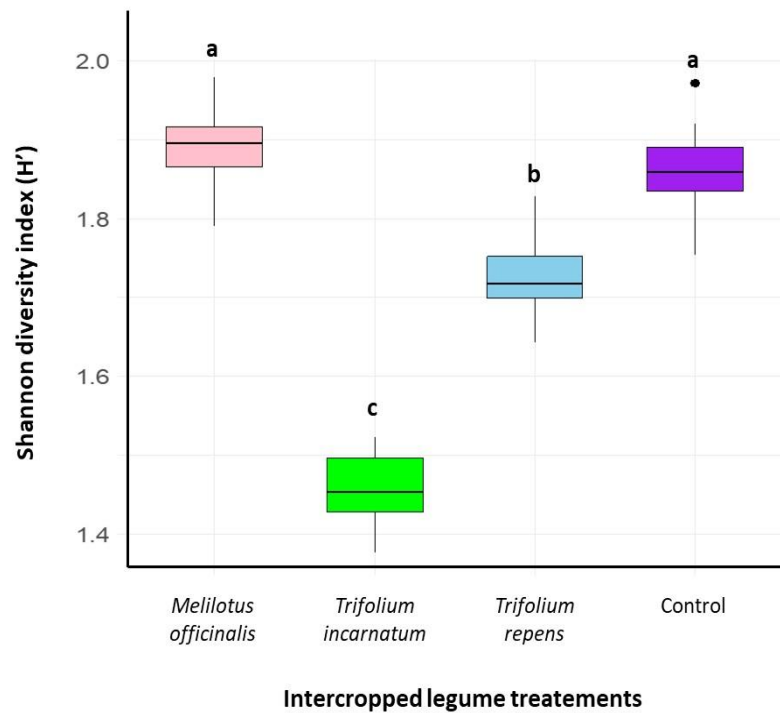


Figure 2 Comparison of Shannon diversity indices (H') in an organic oat crop synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes averaged over the two years of the study. The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within $1.5\times$ the interquartile range. Treatments with values associated with different letters differ significantly from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$.

2.5.3 Species' functional traits

Figures 3 and 4 show the impact of treatments on the aggregated leaf traits of weed communities measured in 2019 and 2020, respectively. Mean leaf trait values for the most abundant weed species found in each treatment in 2019 and 2020 are shown in Tables A1 and A2, respectively. For information, the mean leaf trait values for the intercropped legumes in 2019 and 2020 are shown in Table A3. In 2019, the analyses revealed significant differences between the treatments only for weed SLA (Figure 3b). The SLA of weeds under *T. incarnatum* was 2.8 times higher than the SLA of those

under *M. officinalis* and without intercropped legumes (i.e., the control). The SLA of weeds in the presence of *T. repens* fell between the SLA of those with *T. incarnatum* and in the control but remained higher than the SLA of those under *M. officinalis*. With respect to the other weed traits measured in 2019, the results suggest that despite certain variations observed between species, the treatments had no significant effects (Figure 3). This suggests a homogeneity of responses from these traits, with differences between treatments being limited under the experimental conditions. In 2020, our results showed that the SLA of weeds in the presence of *T. incarnatum* was, as in 2019, higher than the SLA of other treatments, but this time it was much greater than in the previous year (Figure 4b). We also noted that the LDMC was significantly higher in the weeds in the control than those in the presence of intercropped legumes (Figure 4c). The LA of the weeds in the control was also ~2-times higher than that of weeds in the presence of *T. repens*, while the LA of the weeds with *T. incarnatum* and *M. officinalis* was between those of the other treatments (Figure 4d).

2.5.4 Functional structuring of the weed communities

The results of the 2019 and 2020 redundancy analyses brought to light similar aspects as well as notable distinctions between the structuring of the weed communities based on the species' functional traits. In 2019, the first (RDA1) and second (RDA2) axes explained 26.79% and 17.41% of the variance, respectively, showing that a major part of the data structure can be summarized by these two axes. Nevertheless, around 55.8% of the variance remains unexplained (Figure 5). However, the ANOVA results for 2019 showed that RDA1 was significant ($P = 0.0153$) while RDA2 was not ($P = 0.1838$). The RDA1 axis distinguishes weeds primarily on the basis of leaf dry matter content (LDMC, negative scores) on the one hand and leaf area (LA) and specific leaf area (SLA, positive scores) on the other (Figure 5). The species with positive scores on this axis are mainly *S. asper* and *D. carota*. The species with negative scores on the RDA1 axis are mainly *A. millefolium* and *U. urens*. The RDA2 axis separates the weeds primarily according to canopy area (positive scores) and height (negative scores) (Figure 5). The species with a positive score on this axis are mostly *T. officinale* and *D. carota*, while *V. sativa* and *S. asper* had mostly negative scores. The intercropping treatments are more distributed along the RDA2 axis, with the *T. repens*

treatment (positive score) opposed to the *T. incarnatum* treatment (negative score), whose positioning is found in the direction of taller species (Figure 5). Nevertheless, the *T. repens* and *T. incarnatum* treatments are the only ones with positive scores on the RDA1, like SLA.

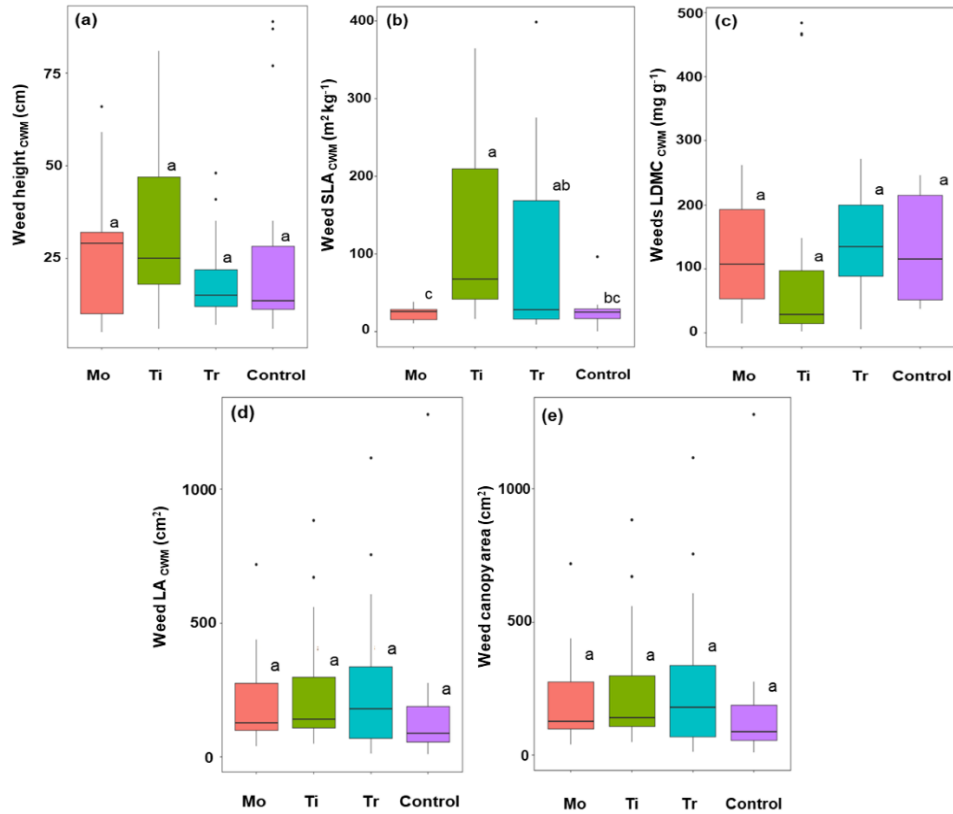


Figure 3 Aggregated traits of weed communities observed in an organic oat crop in 2019, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (Mo = *Melilotus officinalis*, Ti = *Trifolium incarnatum*, Tr = *Trifolium repens*). The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within 1.5× the interquartile range. For each aggregated trait, treatments with values labeled with different letters are significantly different from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$.

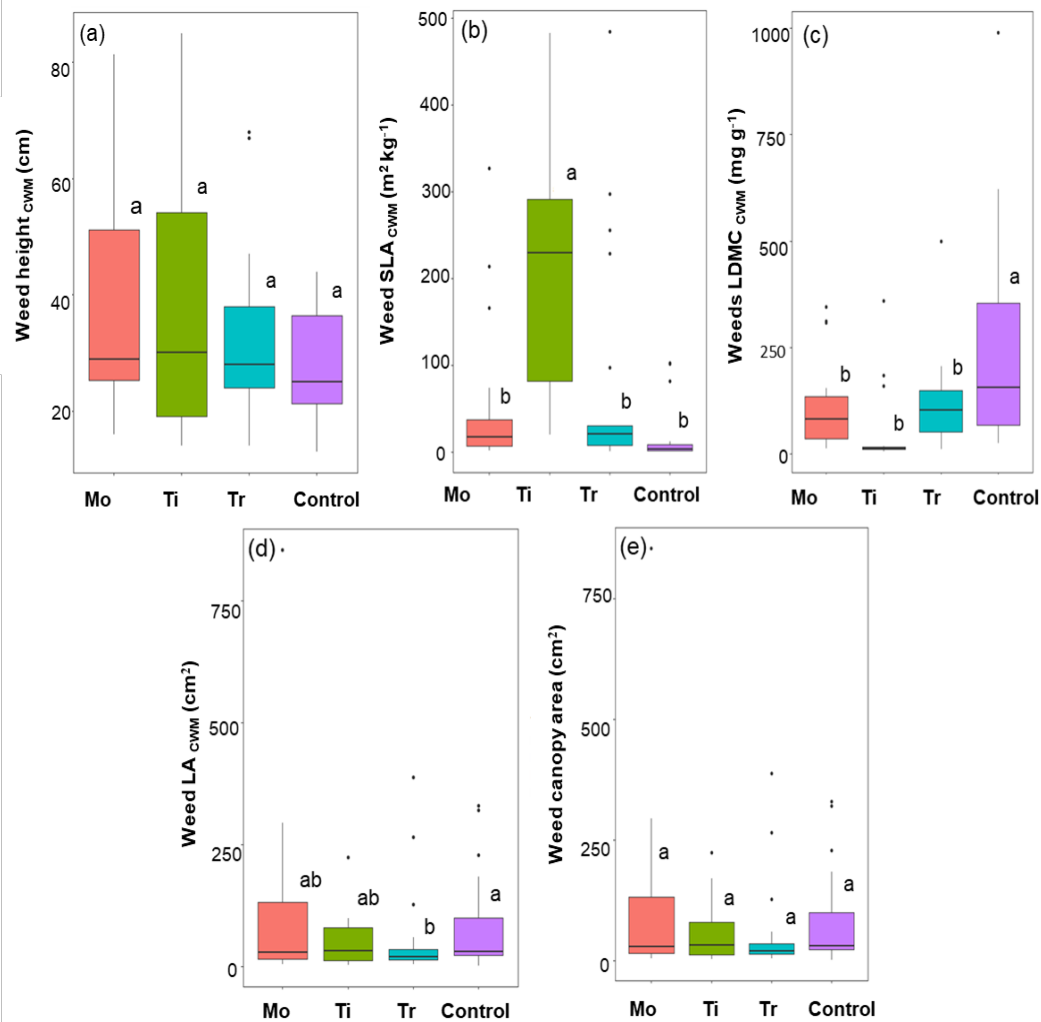


Figure 4 Aggregated traits of weed communities observed in an organic oat crop in 2020, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (Mo = *Melilotus officinalis*, Ti = *Trifolium incarnatum*, Tr = *Trifolium repens*). The lower and upper bounds of the box represent the first and third quartiles, respectively, while the line inside the box represents the median. The vertical bars indicate the minimum and maximum values within 1.5× the interquartile range. For each aggregated trait, treatments with values labeled with different letters are significantly different from each other according to Tukey's test at $P \leq 0.05$.

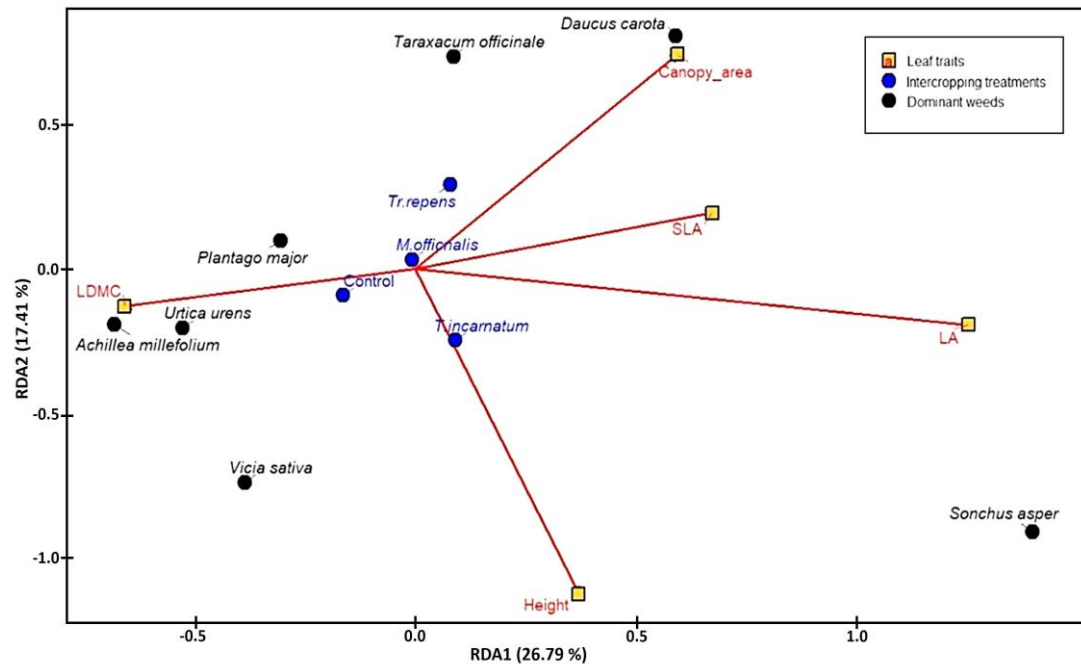


Figure 5 Redundancy analysis showing the distribution of weed leaf traits according to the dominant species in an organic oat crop in 2019, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (*M. officinalis*, *T. incarnatum*, *T. repens*). SLA = specific leaf area, LDMC = leaf dry matter content, LA = leaf area.

The results of the 2020 RDA analysis indicate that the first two axes captured 29.15 % (RDA1) and 18.99 % (RDA2) of the variance. They accounted for 48.14 % of the total variance and captured the strongest relationships between leaf traits and explanatory variables (Figure 6). The ANOVA results for 2020 showed that both RDA1 ($P < 0.001$) and RDA2 ($P < 0.0001$) were significant. The RDA1 axis contrasts LDMC (positive score) with other traits, primarily LA (negative scores). The species with positive scores on this RDA1 axis are mostly *V. sativa* and *E. arvense*, while those with negative scores are mostly *S. arvensis* and *P. major*, which is also associated with the canopy area (Figure 6). The RDA2 axis distinguishes weeds mainly on the

basis of height and SLA (positive scores) on the one hand, and canopy area (negative scores) on the other. The main species with positive scores on this axis are *E. repens* and *S. arvensis*, while *S. asper* and, especially, *P. major* had negative scores. The intercropping treatments are mainly distributed along the RDA1 axis, with the control treatment (positive scores) located opposite the *T. incarnatum* treatment (negative scores). The *T. incarnatum* treatment is strongly associated with SLA (as in 2019) as well as weed height, while the control treatment is strongly associated with LDMC (Figure 6).

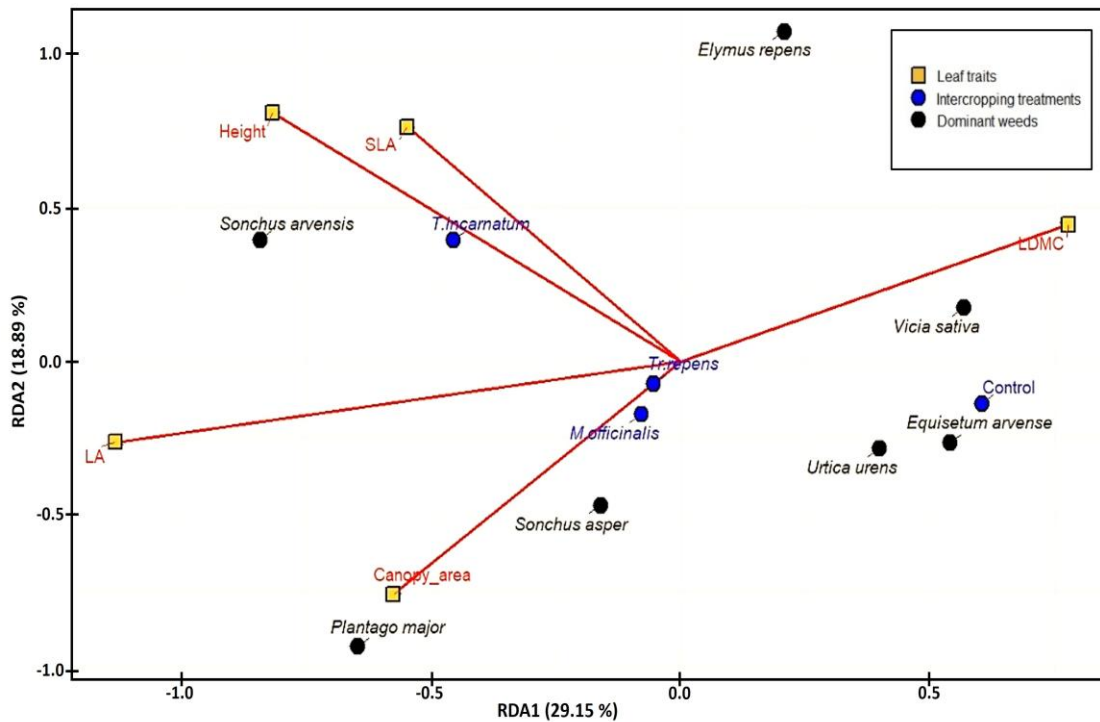


Figure 6 Redundancy analysis showing the distribution of weed leaf traits according to the dominant species in an organic oat crop in 2020, synchronously sown without (Control) or with intercropped legumes (*M. officinalis*, *T. incarnatum*, *T. repens*). SLA = specific leaf area, LDMC = leaf dry matter content, LA = leaf area.

2.6 Discussion

2.6.1 Structure, diversity, and composition of weed communities

Our results show that the presence of intercropped legumes in an organic oat crop favors certain species adapted to competition compared with the control without legumes, which confirms our first hypothesis. This observation is consistent with the work of Smith et al., (2023), who demonstrated that cover crops such as legumes influence plant community structure by favoring certain competitive species. We found seven dominant weed species, which compares with the work of Campiglia et al., (2012), where six weed species were found to be dominant. Interspecific competition between intercropped legumes and weeds leads to significant changes in the structure, diversity, and composition of weed communities, supporting certain species based on their ability to exploit resources in a competitive environment (Aerts, 1999; Smith et al., 2023)

We observed a different evolution in the composition and diversity of weed communities between 2019 and 2020, which validates our second hypothesis. Our results show that species richness varies from one year to the next, depending on the intercropping treatments, with values comparable to those of others working in cropping systems (Stevenson et al., 1997; Légère and Stevenson 2005; Campiglia et al., 2012). While species richness was similar for all the treatments in 2019, it evolved in the following order: control > *M. officinalis* = *T. repens* > *T. incarnatum* in 2020. The significant interaction between treatments and year could be explained by variability in climatic conditions. The effects of agricultural practices can fluctuate depending on each year's specific environmental conditions (Teasdale et al., 2007). In spring 2019, there were fewer growing degree days and precipitation was more abundant (Table 2); growing conditions were less favorable than they were in spring 2020. The failure of intercropping treatments to impact species richness could be attributed to complex ecological factors, such as limited resource availability under less favorable environmental conditions (Aerts, 1999). In spring 2020, more favorable conditions may have reduced constraints on the growth of intercropped legumes and weeds, allowing for a better expression of differences between treatments. Overall, our observations concur with those of previous studies showing that climatic and environmental

conditions strongly influence the composition of plant communities from one year to the next (Werner et al., 2020).

The values of Shannon diversity indices (H') found in our work are <2 , which is similar to values reported in the literature in cropping systems (Stevenson et al., 1997; Légère and Stevenson, 2005; Campiglia et al., 2012). Furthermore, Shannon diversity is significantly influenced by year and treatments, which suggests that inter-row management, through the use of intercropped legumes, can play a key role in structuring plant communities. More specifically, the ~33% increase in H' observed in 2020 compared with 2019 concurs with what Légère et al., (2005), observed in a barley-red clover rotation on a heavy clay soil. Possible explanations could be linked to more favorable climatic conditions, as mentioned above, or to adjustments in interspecific competition, as suggested by Werner et al., (2020). Data presented by Yue et al., (2020), showed that warming increased H' values of grassland species under similar climatic conditions as in our study. However, as underlined by Légère et al., (2005), more data covering consecutive years are needed to determine whether this trend is sustained over time.

The *M. officinalis* treatment and the control presented the highest Shannon diversity indices, reflecting greater weed species diversity than the *T. repens* and *T. incarnatum* treatments. As suggested by Campiglia et al., (2012), a reduced H' under *T. incarnatum* indicates strong suppressive ability of this species against weeds. Sowing *T. incarnatum* resulted in a decrease in weed diversity compared with other intercropping treatments, an indication of the legume's dominance and its soil cover ability, thereby limiting resources and weed growth. The height of *T. incarnatum* was 2.0 to 2.2 times greater than that of *T. repens* in our study (see Table A3), which is comparable to what was found by Ross et al., (2001). The latter study demonstrated that *T. incarnatum* has good weed suppression capacity. Its long and erect stem provides an advantage over shorter intercropped species in reducing weed density and biomass through competition for light, water, and nutrients (Liebman and Dyck, 1993; Ross et al., 2001). Using *T. incarnatum* in our SI system likely modified environmental factors that affected weed germination, establishment and growth; the

presence of this species may have accelerated canopy closure and increased soil cover, thus decreasing the amount of radiation available for weeds and restricting their establishment (Liebman and Davis, 2002; Bilalis et al., 2010; Verret et al., 2017; Bilalis et al., 2010). The use of this legume in rotations or as an intercropped crop results in effective weed control, particularly in organic agricultural systems (Teasdale et al., 2007). The weeds *V. sativa* and *U. urens* are two species found in all the intercropping treatments in 2019. The species *V. sativa* is a nitrogen-fixing leguminous plant with a competitive edge in nutrient-poor systems and is highly resistant to the main crop and other weeds (Coleman et al., 2018). Meanwhile, *U. urens* is regularly found in disturbed environments since it is highly competitive for light and resources (Coleman et al., 2018). Both of these species demonstrate their ability to colonize and dominate the environment in which they are found, while resisting environmental variations. Among the species found in 2020, some were very abundant in all the treatments, particularly *E. repens*, *P. major*, and *U. urens*. These species are among the most generalist weeds able to withstand a wide range of management and ecological conditions in annual crop fields (Fried et al., 2022). The presence of the two latter species (i.e., *P. major*, and *U. urens*) among the most abundant ones during both years could be the result of sowing the same crop two years in a row in the same field. This may have led to increased seed production and addition to the soil seedbank for these species and favored their specialization and dominance (Bitarafan and Andreasen, 2020). Overall, our results underscore the importance of considering both temporal factors and specific treatments in the study of ecological community diversity (Fried et al., 2022).

2.6.2 Functional structure response

Our third hypothesis stipulating that weed growth strategies vary according to treatment and that this influences the functional structure of plant communities was validated. Weed growth strategies reveal marked differences in their responses to intercropping treatments. In particular, our results show that (1) the SLA of weeds was higher under the *T. incarnatum* treatment in 2019 and even more so in 2020, and (2) weed LDMC was higher in the control than in the presence of intercropped legumes in 2020. There is a fundamental trade-off between leaf traits for rapid acquisition and

effective resource conservation (Wright et al., 2004). Plant species characterized by a high SLA and low LDMC are positioned among the “acquisitive” species along the leaf economic spectrum, while “conservative” species are characterized by a low SLA and a high LDMC (Wilson et al., 1999; Wright et al., 2004). Acquisitive plants species have a high rate of resource (i.e., light, water, nutrients) acquisition and poor resource conservation, while conservative ones have opposite characteristics (Garnier et al., 2016). The values noted for the SLA of the weed community under *T. incarnatum* in our work correspond to those positioned at highest end (i.e., $>100 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) of the leaf economic spectrum (Garnier et al., 2016). *T. incarnatum* is the intercropped legume that contributed the most to total botanical composition in both years of the trial. We postulated that this species may have enriched the soil by fixing atmospheric N and returning N-rich biomass, creating a resource-rich environment favorable to acquisitive species with a high SLA, such as *S. arvensis*, *P. major*, and *V. sativa*, although this would need to be confirmed experimentally. Nevertheless, these species adopt a rapid growth strategy, with larger, thinner leaves, typical of R strategies that favor rapid reproduction and high competitiveness (Grime and Hunt, 1975; Grime, 1977).

According to Lambers and Poorter (1992), a high SLA seems to be the trait that most explains a higher specific growth rate observed in some species than in others, i.e., a greater gain in grams of biomass produced per gram of existing biomass per day. Weeds with a high SLA such as *S. arvensis*, *P. major*, and *V. sativa* could thus have a high specific growth rate. There is a positive relationship between specific growth rate and leaf nitrogen content (Poorter and Remkes, 1990). Since the weed community associated with the intercropped legume *T. incarnatum* has a high SLA, perhaps the leaf nitrogen content is also high. This would further enrich the environment, further encouraging the growth of weeds whose growth strategy is based on resource acquisition. In contrast, the weed community found in the control treatment had a lower SLA than that of the *T. incarnatum* treatment in 2019 and a higher LDMC than those of the other treatments in 2020. These species are characterized by a growth strategy focused on effective re-source conservation and an ability to persist under less favorable conditions (Wilson et al., 1999; Wright et al., 2004; Tribouillois et al., 2015).

They include *A. millefolium*, *U. urens*, and *Elymus repens*. The low specific growth rate of “conservative” species appears to be better adapted to poor environments (Chapin, 1980). From a weed management perspective, the use of *T. incarnatum* as an intercrop with oats in an SI system reduced weed diversity and establishment but promoted a weed community whose re-source-acquisition strategy could compete with the main crop. In contrast, the control treatment without legumes in intercropping led to the development of a less competitive weed community with a resource conservation strategy, but one that was much more diverse and able to establish and persist. Further work over several consecutive years is needed to determine which weed management strategy is most sustainable in the long term.

2.7 Conclusion

The novelty of this study highlighted the fact that legumes synchronously intercropped with an organic oat crop influence the richness, abundance, and taxonomic and functional diversity of weeds. The *T. incarnatum* treatment reduced weed cover due to competition from its canopy area, offering a considerable advantage over the other three treatments. It could enrich the soil through nitrogen fixing and the above-ground and root biomass produced, but this was not measured in our work and would need to be evaluated experimentally. However, this sown cover favors weeds whose growth strategy is focused on acquiring resources that could compete with the main crop. In contrast, *M. officinalis* and *T. repens* treatments and the control promoted more diverse communities focused on resource conservation. The effect of year on botanical composition underscores the importance of climatic conditions that modulate weed responses to cultural practices. The assessment of the functional traits of dominant species and the aggregated traits of communities offers a mechanistic look at the response of weeds to changes in agronomic practices and environmental conditions. Our results demonstrate the importance of intercropped legumes as agroecological levers to better manage weeds in organic field crops. The novel results presented in this work could provide agronomists and crop producers indications on the level of competition that weeds exert on cropping system depending on the SI

treatment chosen. Regardless of the legumes used in SI, our finding emphasizes the need to vary crops from year to year through rotations to limit the development and dominance of weeds. However, further research is needed to assess the impacts of synchronous intercropping from an agronomic viewpoint, particularly its impact on the quantity and quality of oat yields and soil nutrients, to offer a complementary vision to the ecological perspective of our work. Future work could also be carried out at other sites under different pedoclimatic conditions to assess whether our results can be replicated.

2.8 Acknowledgements

We would like to thank Daphné Touzin for her contribution to the design and execution of this project, which would not have been possible without her involvement. This project was funded by the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation through the Prime-Vert program (Project #5992627) awarded to Vincent Poirier. The project was also supported by a scholarship from the Mission Universitaire de Tunisie à Montréal awarded to Insaf Chida. We also extend our thanks to Bruno Drouin from Ranch Abitibi for agreeing to participate in this project. Finally, we are grateful to all the members of the field and laboratory teams at the UQAT Centre in Témiscamingue, Notre-Dame-du-Nord, for their invaluable assistance.

3. IINTERCROPPING LEGUMES IN ORGANIC CEREAL PRODUCTION: IMPACTS ON CROP YIELDS, WEEDS, AND CARBON AND NITROGEN INPUTS.

This chapter was submitted to the *Canadian Journal of Plant Science*.

Insaf Chida¹, Noura Ziadi², Stéphanie Lavergne¹ and Vincent Poirier^{1*}

¹ Agriculture and Agri-Food Research Institute, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Notre-Dame-du-Nord, QC J0Z 3B0, Canada

² Quebec Research and Development Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Québec, QC G1V 2J3, Canada

*Author to whom correspondence should be addressed: vincent.poirier@uqat.ca

3.1 Résumé

Les cultures de couvertures de légumineuses sont utiles pour faire face aux enjeux liés à la lutte aux adventices et à la fertilisation du sol en production céréalière biologique. Toutefois, leurs effets peuvent varier selon les espèces et les modes d'implantation. Notre objectif était d'évaluer l'impact de légumineuses intercalaires implantées au semis et au tallage sur les rendements de l'avoine (*Avena sativa*) et du blé (*Triticum aestivum*), la biomasse aérienne des adventices et des légumineuses intercalaires, sa composition chimique et les quantités d'azote (N) et de carbone (C) associées. Deux dispositifs expérimentaux furent implantés en Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada) durant deux années consécutives (i.e., 2019 et 2020), l'un à Poularies dans une culture d'avoine biologique et l'autre à Laverlochère dans une culture de blé biologique. Chaque site incluait quatre traitements et deux modes d'implantation (i.e., au semis et au tallage). À Laverlochère, les traitements consistaient en trois légumineuses intercalaires : trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), trèfle rouge (*Trifolium pratense*) et trèfle blanc (*Trifolium repens*) ainsi qu'un témoin sans légumineuse. À Poularies, ils comprenaient : le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*), le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), le trèfle blanc (*Trifolium repens*), et un témoin. Les légumineuses et les modes d'implantation n'ont pas influencé les rendements des cultures. Dans l'ensemble, nos résultats montrent que le trèfle incarnat produit une biomasse aérienne importante qui lui permet de dominer les adventices. Toutefois, son rapport C/N plus élevé suggère que sa biomasse pourrait être décomposée plus lentement que celles des trèfles rouge et blanc. Bien que les quantités d'azote et de carbone apportées par les légumineuses intercalaires aient été relativement faibles dans notre étude (11–15 kg N ha⁻¹ et 144–200 kg C ha⁻¹), elles constituent une source d'azote facilement minéralisable et de carbone labile pour le sol. Ces résultats fournissent un point de vue agronomique complémentaire pour la gestion optimale des légumineuses intercalaires dans les cultures céréalières biologiques.

Mots-clés : Cultures de couvertures, Légumineuses intercalaires, Biomasse aérienne, Adventices, Rendements, Carbone, Azote, Agriculture biologique.

3.2 Abstract

Legume cover crops are useful for addressing weed control and soil fertilization issues in organic cereal production, but their effects can vary depending on species and sowing times. Our objective was to evaluate how legumes intercropped at sowing time and at the tillering stage influence the yields of oats (*Avena sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*), the above-ground biomass of weeds and legume intercrops, and the associated amounts of nitrogen (N) and carbon (C). Two experiments were established in Abitibi-Témiscamingue (Quebec, Canada) for two consecutive years (i.e., 2019 and 2020), one in an organic oat crop in Poularies and the other in an organic wheat crop in Laverlochère. Each experiment included four treatments and two sowing times (i.e., at sowing or at tillering of cereals). In Laverlochère, treatments consisted of three legume intercrops, crimson clover (*Trifolium incarnatum* L.), red clover (*Trifolium pratense* L.), and white clover (*Trifolium repens*), as well as a control without legumes. In Poularies, treatments consisted of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* [L.] lam.), crimson clover, white clover, and control. Legume intercrops and sowing times did not influence crop yields. Crimson clover produced higher above-ground biomass, which enabled it to dominate weeds, and exhibited a higher C/N ratio compared to red and white clover, indicating differences in biomass quality. Although the amounts of N and C contributed by legume intercrops were relatively low (11–15 kg N ha⁻¹ and 144–200 kg C ha⁻¹), they constitute a source of easily mineralizable N and labile C for the soil. These results provide a complementary agronomic perspective to achieving an optimal management of legume intercrops in organic cereal crops.

Keywords: Cover crops, Legume intercrops, Above-ground biomass, Weeds, Yields, Carbon, Nitrogen, Organic farming.

3.3 Introduction

The intensification of conventional agriculture has made it possible to meet the increasing needs of a growing world population, but its harmful effects on the environment and the resulting loss of biodiversity in agroecosystems call into question the limits of its sustainability (Halde et al., 2017; FAO 2019). Organic farming is considered as an alternative to conventional agriculture, since organic farming practices offer solutions to the environmental pollution caused by plant protection products and chemical fertilizers (Halde et al., 2017; Bayiha et al., 2020). However, the adoption of organic farming practices remains marginal due to major challenges related to pest management and soil fertility (Gamage et al., 2023), particularly in the production of cereals such as oats (*Avena sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.).

Several studies have highlighted agroecological practices that are efficient for improving ecosystem functions related to weed management and soil fertility. In particular, cover crops provide a multitude of ecosystem services in agricultural environments (Finney et al., 2017; Schipanski et al., 2014; Rakotomanga et al., 2022, 2023; Fried et al., 2022). The biomass produced by cover crops helps to control weeds and provides carbon (C) and nitrogen (N), which can improve the physical and chemical properties and fertility of the soil (Mohanty et al., 2011; Tautges et al., 2019; Lavergne et al., 2021a ; Fried et al., 2022). However, different species of cover crops are available and the methods of using them in cereal production also differ, which can influence the amount of biomass produced by both the cover crops themselves and the weeds that grow alongside them, an area that remains understudied (Gardarin et al., 2022).

Members of the legume family (Fabaceae) can be grown as cover crops in organic cereal production to add N and C to the soil, control weeds, and increase yields (Verret et al., 2017; Vrignon-Brenas et al., 2018; Lavergne et al., 2021b; Bourgeois et al., 2022; Gardarin et al., 2022). However, there is a trade-off between the ability to produce abundant biomass to control weeds, on the one hand, and providing N-rich biomass that can increase yields, on the other, and the nature and extent of

the trade-off varies greatly from one species to another (Finney et al., 2017). The use of certain species, such as red clover (*Trifolium pratense* L.) and white clover (*Trifolium Repens* L.), is well documented in the literature, while this is not true for others, such as yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* [L.] Lam.) and crimson clover (*Trifolium Incarnatum* L.) (Verret et al., 2017). Crimson clover can produce abundant biomass and effectively control weeds (Abdin et al., 2000). However, its N content, like that of yellow sweet clover, may be lower than that of red and white clover (Brandsæter et al., 2008; Rohwer 2025). Yellow sweet clover may be more heat-resistant than other legumes, but it is less tolerant to poorly drained soils and less effective at controlling weeds in the early stages of growth (Vanasse et al., 2022).

The timing of legume intercrop establishment affects the services these crops provide in cereal production. When legumes are present alongside cereals for a significant portion of their life cycle, the former are said to be intercropped (Gardarin et al., 2022; Vanasse et al., 2022). When legume intercrops are planted at the same time as cereals, sowing is simultaneous and synchronized, but when they are planted later in the season, after cereals have reached a certain stage of development, sowing is asynchronous (Gardarin et al., 2022; Vanasse et al., 2022). With asynchronous sowing, the legume intercrops are less likely to compete with cereals and negatively affect yields, but their growth period will be shorter and their ability to compete with weeds may be limited (Verret et al., 2017; Gardarin et al., 2022). The impact of these sowing times could also vary depending on the legume species planted, but this has not been studied extensively. The resulting lack of knowledge limits our ability to provide agricultural businesses with the tools they need to determine which legume intercrops to plant and when to do so in order to produce abundant biomass, provide N and C, control weeds, and potentially increase yields.

The objective of this study was to evaluate the impact of four species of legume intercrops (i.e., red, white, and crimson clover, and yellow sweet clover) planted at sowing time or at the tillering stage in organic oat and wheat production on (a) oats

and wheat yields; (b) the above-ground biomass of weeds and legume intercrops; (c) N and C concentrations in the above-ground biomass of legume intercrops; and (d) the amounts of N and C contained in the above-ground biomass of legume intercrops. Our hypotheses were: (H1) the presence of legume intercrops should have a positive influence on cereals yields and (H2) should reduce the amount of biomass produced by weeds compared to the control treatment (without legume intercrops); (H3) crimson clover should produce more above-ground biomass than other legume intercrops and consequently reduce above-ground weed biomass to a greater extent than other legume intercrops; (H4) the biomass of white and red clover should be richer in N than that of crimson clover and yellow sweet clover and consequently contribute more N and C to the soil; and (H5) planting legume intercrops at sowing time should allow for better establishment of intercrops, leading to greater above-ground biomass production and N and C inputs than planting at the tillering stage. To test these hypotheses, two trials were set up under real farm conditions over two consecutive years in Abitibi-Témiscamingue, a region in eastern Canada where few studies on the subject have been conducted to date.

3.4 Materials and Methods

3.4.1 Study sites

The two sites are located in two different locations in western Quebec, more than 140 km apart as the crow flies. The first site is in the Abitibi-Ouest region, in the municipality of Poularies (Quebec, Canada; 48°39'41.5"N; 79°01'03.8"W) in a field where oats were grown during the two years of the experiment. The climate is cold and humid continental, which corresponds to category Dfb according to the Köppen classification (Peel et al., 2007). Meteorological data for the two growing seasons (i.e., 2019 and 2020) are presented in Table 6. During this period, average temperatures ranged from approximately 6.9 to 19.7°C between May and September. Precipitation was moderate, ranging from 41 to 133 mm per month. The study site is located on heavy clay soil of the Roquemaure series. Soils of this series are characterized by poor drainage and typically contain ~900, ~100, and ~0 g kg⁻¹ of clay (<2 µm), silt (2–50 µm), and sand (50–2000 µm), respectively, in the

surface horizon (i.e., 0–30 cm depth). They are classified as humic Gleysols in the Canadian System of Soil Classification (Rompré and Carrier, 1997; Soil Classification Working Group, 1998). The topography of the region is relatively flat, with the site located on a vast clay plain at an elevation of approximately 300 m. The soil N and C concentrations and bulk density at a 0–15 cm horizon were 3.62 g N kg⁻¹, 44.6 g C kg⁻¹, and 1.26 g cm⁻³, respectively.

The second site is located in Laverlochère, in the Témiscamingue region (Quebec, Canada; 47°25'35"N, 79°18'27"W), where organic wheat was grown during the two years of the study. The climate is humid continental and classified as Dfb according to the Köppen-Geiger classification (Peel et al., 2007). During the two growing seasons (2019 and 2020), average temperatures ranged from 8.6 to 20.7°C, and monthly precipitation was moderate, ranging from 51 to 136 mm (Table 6). The cumulative 5°C degree days, ranging from 173 to 412, indicate a relatively short growing season but one that is favorable for crop development. The study site also has a flat topography and is located on heavy clay soil, but of the Guérin series. These soils are characterized by poor drainage and typically contain ~550, ~390, and ~60 g kg⁻¹ of clay (<2 µm), silt (2–50 µm), and sand (50–2000 µm), respectively, in the surface horizon (i.e., 0–30 cm depth). They are also classified as humic Gleysols in the Canadian Soil Classification System (Rompré and Carrier, 1997; Soil Classification Working Group 1998). The soil N and C concentrations and bulk density at a 0–15 cm depth were 4.29 g N kg⁻¹, 64.8 g C kg⁻¹, and 1.27 g cm⁻³, respectively.

Table 6 Weather data during the 2019 and 2020 growing seasons in Poularies† and Laverlochère‡

Month	Average temperature			Precipitation			Days of precipitation			Growing degree days based on 5°C		
	(°C)			(mm)			(No)			(No)		
	2019*	2020*	Avg #	2019*	2020*	Avg #	2019*	2020*	Avg#	2019*	2020*	Avg #
Poularies												
May	6.9	7.5	9.3	56	41	76	11	11	nd	63	147	134
June	14.0	15.5	14.3	133	84	88	12	13	nd	249	300	280
July	18.8	19.7	16.9	65	125	100	9	16	nd	397	441	368
August	15.7	15.4	15.3	91	61	97	14	11	nd	318	309	320
September	11.1	10.6	10.2	95	114	108	13	19	nd	163	166	154
October	5.3	1.6	4.0	97	127	82	16	20	nd	42	13	8
Laverlochère												
May	8.6	9.8	10.6	99.5	51.1	74.5	14	8	nd	107	178	173
June	15.8	17.1	15.6	95.5	65.6	83.8	12	13	nd	311	350	318
July	20.3	20.7	18.3	73.2	126.9	84.5	6	13	nd	455	481	412
August	17.4	17.1	16.9	54.1	68.3	86.2	12	13	nd	374	373	367
September	12.8	11.9	11.7	97.9	135.4	89.5	14	16	nd	226	199	202
October	6.4	3.6	5.5	103.2	134.8	77.4	15	17	nd	62	26	26

† Data from the weather station located in Palmarolle, approximately 15 km from Poularies.

‡ Data from the weather station located in Duhamel-Ouest, approximately 12 km from Laverlochère.

Data obtained from the Agrométéo Québec website (http://www.agrometeo.org/indices/mcd_estim). Average for the 1981–2010 period obtained from the Agrométéo Québec website (<http://www.agrometeo.org/indices/category/general#>).

3.4.2 Experimental design

An experiment was conducted at the two sites described above, by planting legumes as intercrops in a cereal crop at sowing time and at the tillering stage of the cereal. Although the species planted at the two sites differed, the structure of the complete factorial block experimental design was the same in both cases. The treatments tested included the intercropped legume species (the three legume intercrops and a control, without intercrops) and sowing time (at sowing or at the tillering stage of the cereal), for a total of eight treatments. At each site, the field was divided into two separate blocks, in which the eight treatments were randomly assigned to eight separate plots. Each plot was set up under actual farm conditions, using the equipment commonly employed for seeding operations, and measured approximately 9 m × 125 m. Two 1 m × 1 m quadrats were arbitrarily placed at least 60 m apart in each plot and each

block, so as to form four independent experimental units (i.e., four replicates) for each treatment. The experimental design therefore involved a total of 32 experimental units: 4 legume intercrops treatments $\times$ 2 sowing time treatments $\times$ 2 quadrats per plot $\times$ 2 blocks. This design was implemented at the same location during the two years of the experiment. However, owing to equipment failure, the legume intercrops could not be planted at the tillering stage of the oats in 2019 at the Poularies site.

At the Poularies site, the intercropped legume treatments consisted of (1) yellow sweet clover; (2) crimson clover; (3) white clover; and (4) a control without legume intercrops where weeds grew spontaneously. The planting treatments consisted of (1) planting legume intercrops at the same time as the oats were sown using a John Deere grain drill approximately 4.3 m wide and (2) broadcast planting of the legume intercrops at the tillering stage of the cereal using the same John Deere grain drill. The oat rows were spaced 16.5 cm apart. At the Laverlochère site, the intercropped legume and planting treatments were similar except for yellow sweet clover, which was replaced by red clover. Simultaneous planting of legume intercrops with wheat was done using a John Deere grain drill approximately 6 m wide, and broadcast planting of the legume intercrops at the tillering stage of the wheat was done with an air seeder equipped with a rear-mounted harrow. Wheat rows were spaced approximately 19.0 cm apart. Dates for field work operations at both sites are presented in Table 7. The sowing dates were chosen to correspond to the most common agronomic practices in the region for field crops (i.e., early June for sowing and late June/early July for the tillering stage). No fertilization was added at both sites.

White, red, and crimson clover and yellow sweet clover were sown at rates of 6, 8, 15, and 5 kg ha⁻¹ for establishment at sowing and 8, 12, 25, and 15 kg ha⁻¹ for establishment at tillering, respectively, in accordance with the current agronomic recommendations (Daphne Touzin, personal communication, 2019). However, a rate of 6 kg ha⁻¹ was mistakenly used for establishing

crimson clover at the tillering stage at Laverlochère in 2020. The sowing rate for oats and wheat was 170 kg ha⁻¹. Legume intercrops planted at tillering were planted at stages 21 (early tillering) and 23 (3 tillers visible) on the Zadoks scale (Zadoks et al., 1974) at the Poularies and Laverlochère sites, respectively.

Table 7 Dates of fieldwork conducted between 2019 and 2020 in Poularies and Laverlochère

Year	Site	Establishment Date		Cereal Harvest	Legumes and Weeds Sampling Dates
		Sowing	Tillering	date	
2019	Poularies	09 june	nd	09 october	09 october
	Laverlochère	13 june	12 july	17 september	19 october
2020	Poularies	07 june	06 july	21 september	24 september
	Laverlochère	08 june	03 july	14 september	29 september

3.4.3 Grain harvest and yield analysis

Crop yields were assessed at the time of grain harvest (Table 7). In each of the quadrats arranged in the plots (1 m², see section 2.2 above), the oat plants harvested at the Poularies site and the wheat plants harvested at the Laverlochère site were cut at the same height as used for the combine harvester (i.e., approximately 10 cm from the soil surface). The whole plants were collected in kraft paper bags and taken to the laboratory, where the ears were dried at 37°C for 72 hours and the rest of the plant was discarded. The oat and wheat ears were then sent to the Grain Research Centre (CEROM, St-Mathieu-de-Beloeil, Quebec) to determine grain yield using a Wintersteiger Hege 160 stationary thresher. The moisture content (%) of the grain was measured in each sample by near-infrared analysis using a FOSS Infratec™ 1241 instrument. The yield was calculated using the following formula :

$$\text{Yield} = \text{Total grain weight (kg)} / \text{harvested area (m}^2\text{)} * 10,000 \quad (\text{Eq. 1})$$

Yields were reported on a 15% grain moisture basis (Yield 15%, Mg ha⁻¹) using the following formula:

$$\text{Yield 15\%} = [\text{Yield}_B \times (100 - \text{Moisture}_B)] / (100 - 15) \quad (\text{Eq. 2})$$

where Yield_B and Moisture_B are respectively the yield (Mg ha⁻¹) and moisture content (%) of the grain measured after the stationary threshing of the sample.

3.4.4 Cover crop and weed biomass

Sampling of the above-ground biomass produced by legume intercrops and weeds was carried out after the cereal harvest, except at the Poularies site in 2019, where it was done on the same day due to the late harvest date (i.e., October 9, 2019, Table 7). All above-ground biomass present in the quadrats (located in the same places where the crops were harvested) was collected, placed in kraft paper bags, and transported to the laboratory. The above-ground biomass of the weeds and legume intercrops was then separated manually, dried separately at 55°C for a minimum of 72 hours, and weighed. The amount of dry above-ground biomass of the legume intercrops (Qty_{BA_LEG}) and weeds (Qty_{BA_ADV}) harvested in each quadrat (i.e., g m⁻²) was multiplied by 10 so that it could be reported in kg ha⁻¹. The proportion of above-ground biomass of legume intercrops and weeds (Prop_{LEG or ADV, %}) was calculated based on the total amount of biomass harvested as follows:

$$\text{Prop}_{\text{ADV}} = [\text{Qty}_{\text{BA_ADV}} / (\text{Qty}_{\text{BA_LEG}} + \text{Qty}_{\text{BA_ADV}})] \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

3.4.5 Analysis of C and N concentrations in legume above-ground biomass

The dry above-ground biomass of the legume intercrops sampled in 2020 only was ground to <1 mm using a high-speed ultra-centrifugal rotor mill (model ZM 200, manufactured by Retsch®). Approximately 200 mg of dried above-ground biomass was taken per sample to determine the C and N concentrations by dry combustion in an Elementar Vario Max Cube elemental analyzer. The results of these analyses were expressed in g C or N kg⁻¹ dry biomass, and the ratio of these element concentrations was used to calculate the C/N ratio.

3.4.6 C and N input from above-ground legume biomass

We calculated the amounts of C and N contributed by the above-ground biomass of the legume intercrops (C_{Input} or N_{Input} , kg C or N ha⁻¹), based on the amounts of the biomass harvested and the results of the C and N concentration analyses, as follows:

$$C_{\text{Input}} \text{ or } N_{\text{Input}} = [C \text{ or } N]_{\text{BA_LEG}} \times \text{Qty}_{\text{BA_LEG}} \quad (\text{Eq. 4})$$

where $[C \text{ or } N]_{\text{BA_LEG}}$ is the concentration of C or N in the above-ground biomass of the legume intercrops expressed in g C or N kg⁻¹ dry biomass. The results of the C or N concentrations from the analyses carried out in 2020 were applied to the biomass quantities for both years in order to calculate the C and N inputs from the above-ground biomass of legume intercrops in 2019 and 2020. As flowering was observed in both years for all legume intercrops, we assumed that all species reached a similar phenological stage.

3.4.7 Statistical analyses

We evaluated the impact of the four legume intercrops treatments and the two sowing times, as well as their interactions, on the following dependent variables: crop yields, aboveground biomass and proportion of weeds and legume intercrops, C and N concentrations and C/N ratio of above-ground legume biomass, and quantities of C and N contributed by this biomass. The analyses were performed independently for both sites and separately for each of the two years. As mentioned above, the analyses of C and N concentrations and the C/N ratio were only performed on the biomass harvested in 2020, and the legume intercrops at tillering could not be planted in 2019 at Poularies due to machinery failure.

We performed an analysis of variance (ANOVA) using the MIXED procedure in SAS software (SAS Institute, 2023) to test the effects of legume intercrops, sowing times, and their interactions on the dependent variables mentioned above. Block was included as a random effect in the model. The normality of the distribution of residuals and the homogeneity of variances were verified using the PLOT and UNIVARIATE procedures in SAS. Logarithmic, square root, or rank transformations were applied to the data when necessary to meet the assumptions of ANOVA. When the ANOVA

results generated a significant effect, we compared the treatment means using Fisher's least significant difference test to identify those that differed from each other. Effects were declared significant at $P < 0.10$.

3.5 Results

3.5.1 Crop yields

At the Laverlochère site, the results showed no differences in wheat yields between treatments for the two growing seasons. However, yields were higher in 2019 ($3.72 \pm 0.08 \text{ Mg ha}^{-1}$) than in 2020 ($2.02 \pm 0.07 \text{ Mg ha}^{-1}$). At the Poularies site, average oat yields were also not influenced by treatments during the two years of the study. However, unlike Laverlochère, yields were lower at the Poularies site in 2019 ($0.76 \pm 0.07 \text{ Mg ha}^{-1}$) than in 2020 ($1.13 \pm 0.06 \text{ Mg ha}^{-1}$).

3.5.2 Biomass of weeds and legumes

Our results show significant impacts of the intercropped legume treatments and sowing times on weed biomass quantities at both the Laverlochère and Poularies sites during the two years of the experiment (Fig. 7). At the Poularies site in 2019, the amount of weed biomass was also significantly higher ($P < 0.01$) in the control plots, at approximately $145 \pm 29 \text{ kg ha}^{-1}$, which is almost three times higher than in those with legume intercrops (Fig. 7b). At the Laverlochère site in 2019, weed biomass was significantly greater ($P = 0.006$) in the control plots than in those with legume intercrops (Fig. 7a). Although no significant differences were detected in weed biomass under the three legume intercrops treatments, the quantity of weeds with crimson clover intercropping was numerically 1.8 and 2.4 times smaller than with red and white clover intercropping, respectively (Fig. 7a).

At the Poularies site in 2020, weed biomass was significantly ($P = 0.023$) higher in the control treatments (i.e., $411 \pm 51 \text{ kg ha}^{-1}$) than in the white clover and crimson clover treatments, where the weed biomass was 2.1 times lower (Fig. 7d). However, no significant main effect of sowing time was detected at this site. At the Laverlochère site in 2020, a significant interaction effect ($P = 0.006$) was observed between legume

treatments and sowing times; red clover planted at sowing and tillering, as well as crimson clover planted at tillering, reduced the weed biomass by almost half relative to that in the control plots associated with tillering planting (Fig. 7c).

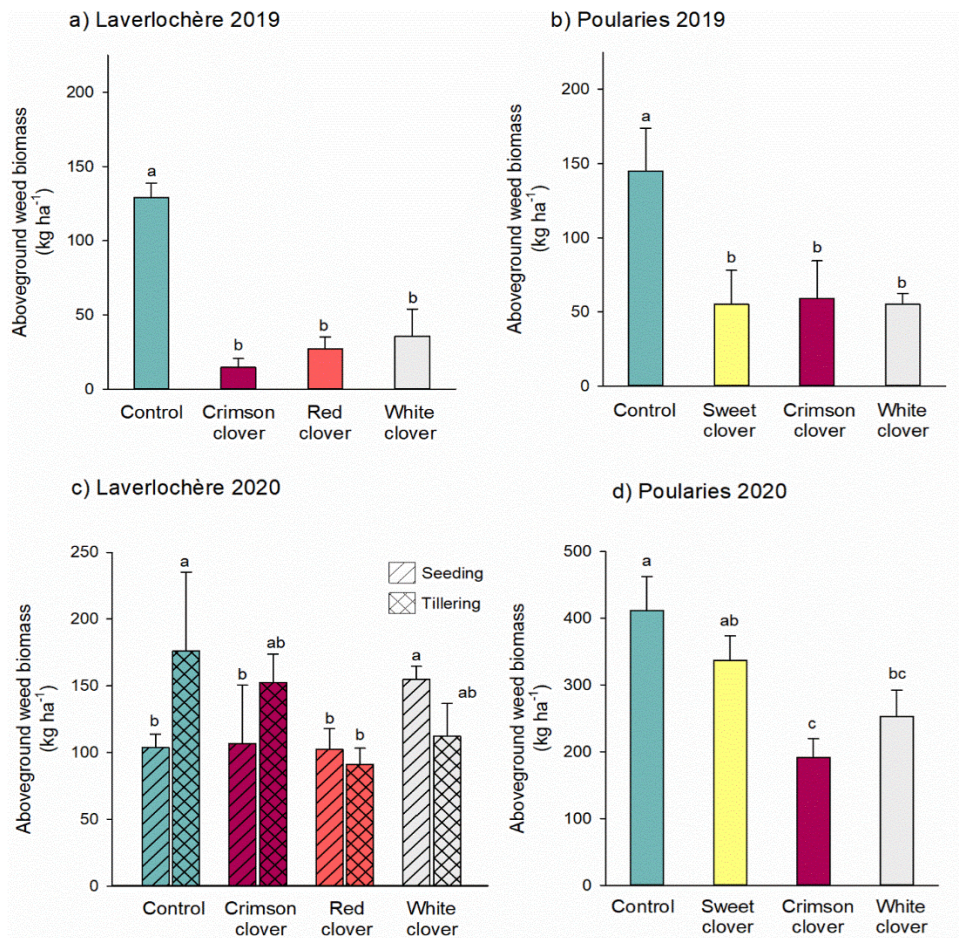


Figure 7 Above-ground biomass produced by weeds at the Laverlochère and Poularies sites in 2019 (a, b) and in 2020 (c, d). Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the mean values differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test. Please note the changes in scale from one graph to another on the y-axis.

The three legume species produced approximately $361 \pm 26 \text{ kg ha}^{-1}$ of above-ground biomass at the Laverlochère site in 2019, with no significant differences observed between treatments, even though the numerical values of the biomass of white and crimson clover were approximately 1.4 times higher than that of red clover (Fig. 8a). In contrast, values at the Poularies site during the same year differed significantly ($P = 0.028$) by legume species; crimson clover produced more than twice as much biomass than white clover, which produced 1.5 times more than yellow sweet clover (Fig. 8b). In 2020, the above-ground biomass of legume intercrops at Laverlochère also differed significantly ($P = 0.008$) by species, with crimson clover producing 1.8 times more biomass than white clover, which produced twice as much as red clover (Fig. 8c). At this site, above-ground biomass production by red clover was slightly lower in 2020 than in 2019, but roughly two and three times lower for white and red clover, respectively, in the same two years (Fig. 8a and 8c). Lastly, at the Poularies site in 2020, the effect of legume species was also significant ($P = 0.002$); crimson and white clover produced more than five times the amount of biomass produced by yellow sweet clover (Fig. 8d).

Similar to the Laverlochère site, the above-ground biomass produced by legume intercrops at the Poularies site was higher in 2019 than in 2020. Although not tested statistically, the differences between the two years appeared much greater at this site (Fig. 8b and 8d). The above-ground biomass of legume intercrops expressed as a proportion of the total inter-row biomass in 2019 at the Laverlochère and Poularies sites was evaluated at $93 \pm 2\%$ and $90 \pm 2\%$, respectively, with the remainder attributed to weeds. These proportions were not influenced by treatments. In 2020, however, a legume species effect was found at both locations. At Laverlochère, the proportion of above-ground biomass from legume intercrops was significantly higher ($P = 0.003$) than that from weeds with crimson clover (i.e., $72 \pm 4\%$ legumes, $28 \pm 4\%$) compared to red clover (i.e., $46 \pm 4\%$ legumes, $54 \pm 4\%$ weeds) and white clover (i.e., $57 \pm 7\%$ legumes and $43 \pm 7\%$ weeds). At Poularies, the proportion of above-ground biomass from legume intercrops was significantly lower ($P = 0.006$) and that from weeds with yellow sweet clover (i.e., $8 \pm 3\%$ legume, $92 \pm 3\%$ weeds) than with

crimson clover (i.e., $43 \pm 4\%$ legumes and $57 \pm 4\%$ weeds) and white clover ($35 \pm 6\%$ legumes and $65 \pm 5\%$ weeds).

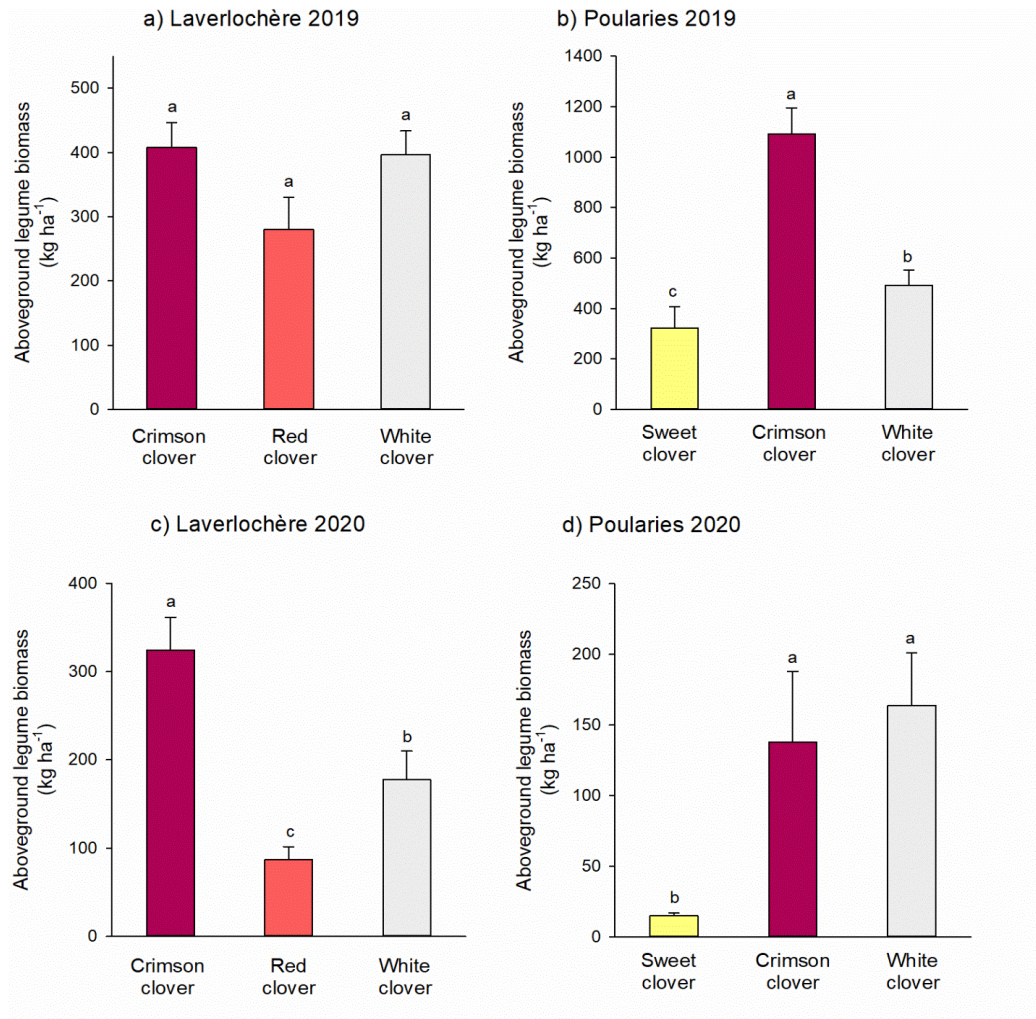


Figure 8 Above-ground biomass produced by legumes at the Laverlochère and Poularies sites in 2019 (a, b) and in 2020 (c, d). Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the mean values differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test. Please note the changes in scale from one graph to another on the y-axis.

3.5.3 C and N concentrations in legume above-ground biomass

Table 8 shows the C and N concentrations and C/N ratio in the above-ground biomass of legume intercrops analyzed in 2020. At the Laverlochère site, the sowing time was observed to have a significant effect ($P = 0.051$) on the C concentration; the concentration when legume intercrops were planted at sowing ($419 \pm 2 \text{ g C kg}^{-1}$) was higher than when they were planted at the tillering stage ($401 \pm 7 \text{ g C kg}^{-1}$). We also noted a significant interaction effect ($P = 0.022$) between legume species and sowing time on the N concentrations the above-ground biomass of legume intercrops; those of red clover planted at sowing and at the tillering stage, as well as of white clover planted at sowing, were higher than that of crimson clover planted at the tillering stage (which was also slightly higher than when this species was planted at sowing) (Table 8). A significant interaction effect ($P = 0.020$) was also noted between legume type and sowing time for the C/N ratio. This ratio was ~20% higher in crimson clover planted at sowing than at tillering, while the C/N ratio of crimson clover planted at tillering was approximately 21% higher than that of red and white clover planted at sowing or tillering (Table 8).

In Poularies, legume species and sowing time interacted significantly ($P < 0.001$) to influence the C concentrations in the above-ground biomass of legume intercrops. The highest ones were observed for crimson clover planted at sowing and tillering, white clover planted at sowing, and yellow sweet clover planted at tillering, and the lowest ones were observed for yellow sweet clover planted at sowing and white clover at tillering (Table 8). A significant interaction ($P = 0.004$) between legume species and sowing time was also noted on N concentrations. That of white clover planted at sowing was higher than those of white clover and crimson clover planted at tillering,

and of yellow sweet clover planted at sowing (Table 8). No effect was observed on the C/N ratio of legume intercrops above-ground biomass; the latter averaged 17.9 ± 0.6 .

Table 8 Carbon (C) and nitrogen (N) concentrations and C/N ratio of aboveground legume biomass harvested in 2020 in Laverlochère and Poularies

Implantation mode	Legume type	C concentration (g C kg ⁻¹ biomass)	N concentration (g N kg ⁻¹ biomass)	C/N ratio
-	-	-	-	-
Laverlochère 2020				
Seeding	Crimson clover	423.9 (1.4) ^{a†}	25.3 (1.5) ^d	16.9 (1.0) ^a
	Red clover	417.3 (2.4) ^a	36.6 (0.6) ^a	11.4 (0.1) ^c
	White clover	416.2 (7.0) ^a	36.3 (1.9) ^{ab}	11.5 (0.4) ^c
Tillering	Crimson clover	409.1 (3.1) ^b	29.4 (1.5) ^c	14.0 (0.7) ^b
	Red clover	415.8 (5.5) ^b	35.0 (1.2) ^{ab}	11.9 (0.4) ^c
	White clover	377.9 (13.3) ^b	32.7 (0.8) ^b	11.6 (0.4) ^c
Poularies 2020				
Seeding	Sweet clover	324.0 (25.4) ^b	16.5 (0.7) ^d	19.6 (1.0) ^a
	Crimson clover	417.5 (14.2) ^a	23.0 (2.4) ^{ab}	18.9 (2.3) ^a
	White clover	408.9 (11.6) ^a	27.0 (1.9) ^a	15.3 (0.7) ^a
Tillering	Sweet clover	399.2 (9.0) ^a	24.1 (1.2) ^{ab}	16.7 (1.3) ^a
	Crimson clover	405.0 (5.0) ^a	20.8 (0.5) ^{bc}	19.5 (0.5) ^a
	White clover	336.8 (15.1) ^b	19.2 (0.3) ^{cd}	17.5 (0.5) ^a

[†] Values in parenthesis are mean standard errors. Means having distinct lowercase letters differ significantly from each other according to Fisher's Least significant difference (LSD) test.

3.5.4 N and C inputs from above-ground biomass

At the Laverlochère site in 2019, no treatment effects were observed for N and C inputs from above-ground biomass, and these amounts were similar for all legume intercrops (i.e., approximately 11.1 ± 0.9 kg N ha⁻¹ [Fig. 9a] and 144 ± 12 kg C ha⁻¹ [Fig. 9c]). However, at the Poularies site in the same year, the type of legume significantly influenced N ($P = 0.059$, Fig. 9b) and C ($P = 0.012$, Fig. 9d) inputs. The above-ground biomass of crimson clover contributed approximately twice as much N and C as that of white clover and more than four times as much as that of yellow sweet clover. At the Laverlochère site in 2020, the type of legume also significantly influenced the amounts of N ($P = 0.024$) and C ($P = 0.008$) contributed by above-ground biomass. The N input was highest with crimson clover, i.e., 1.4 times higher than with white clover although this difference was not significant (Fig. 10a). However, the N input from these two species was significantly higher than that from red clover (Fig. 10a). The amount of C from the above-ground biomass of crimson clover was nearly two and four times higher than that from white and red clover, respectively (Fig. 10c).

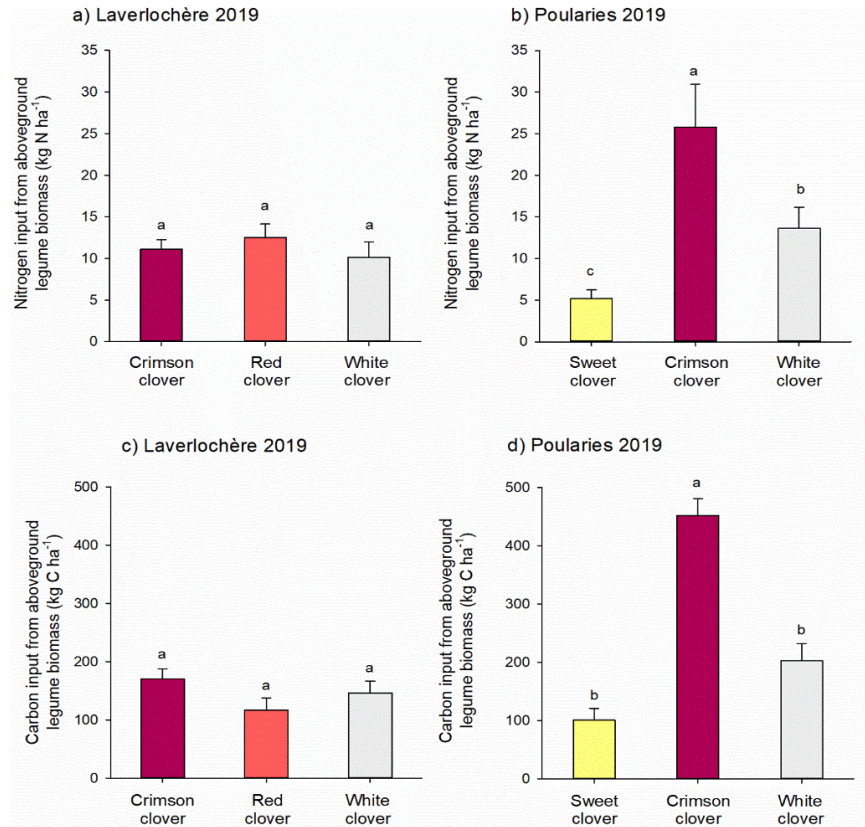


Figure 9 Nitrogen (N) (a, b) and carbon (C) (c, d) inputs from legume above-ground biomass at the Laverlochère and Poularies sites in 2019. Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the means differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test.

Finally, at the Poularies site in 2020, we observed a significant interaction effect between legume type and sowing time on the amounts of N ($P = 0.067$, Fig. 10b) and C ($P = 0.046$, Fig. 10d) contributed by legume above-ground biomass. White clover planted at sowing provided more N than when planted at the tillering stage, whereas yellow sweet clover's N contribution was similar regardless of sowing time. Crimson clover contributed intermediate amounts of N, unaffected by sowing time. For C inputs, those from white clover sown at sowing and from crimson clover, whether sown at sowing or at tillering, were higher than those from the other treatments (Fig. 10d).

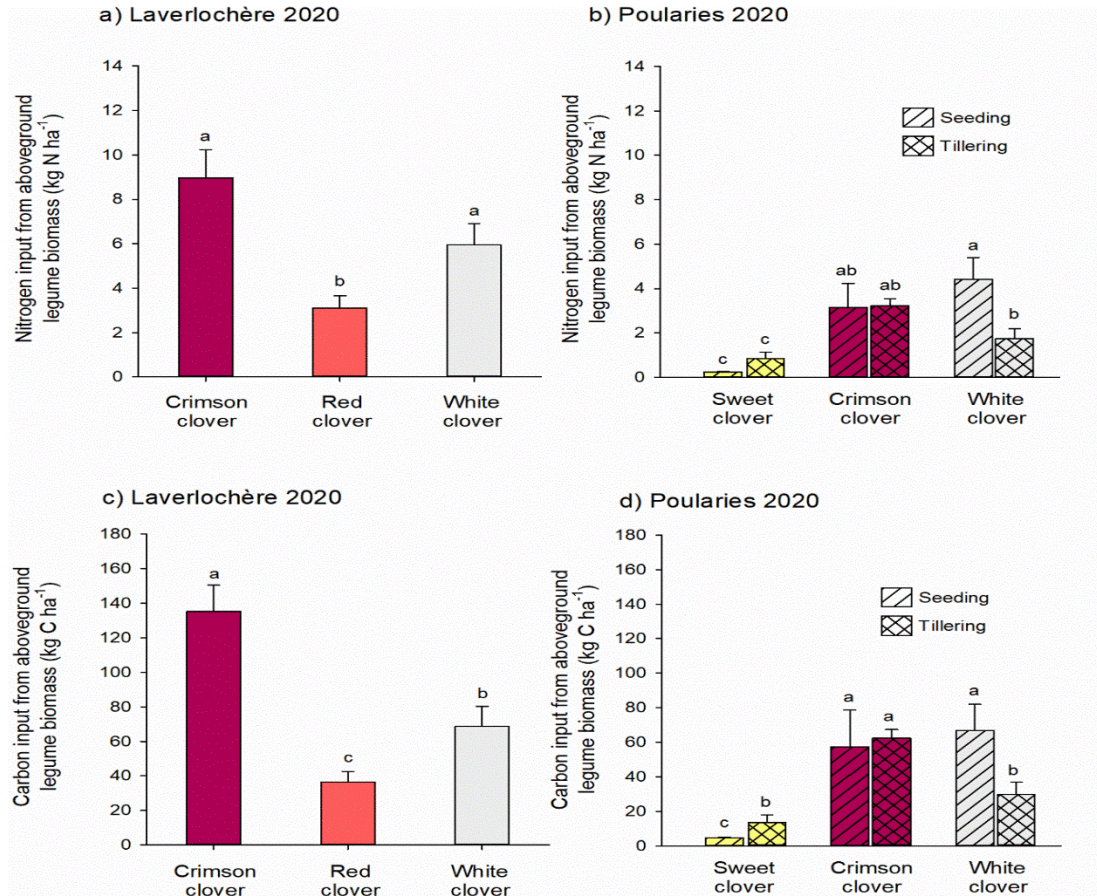


Figure 10 Nitrogen (N) (a, b) and carbon (C) (c, d) inputs from legume above-ground biomass at the Laverlochère and Poularies sites in 2020. Error bars represent the standard error of the mean. Different letters indicate that the means differ significantly from each other according to Fisher's least significant difference (LSD) test.

3.6 Discussion

3.6.1 Crop yields

The results show no impact of the treatments on the yields of the main crop at either site during the two years, when compared with control plots without legume intercrops and with natural weed infestation (i.e., no weed control). However, we observed a

decrease in wheat yields from 2019 to 2020 at the Laverlochère site, but an increase in oat yields from 2019 to 2020 at the Poularies site. This difference could be explained by factors related to the specific climatic conditions at each site (Ben Mariem et al., 2021). In the spring of 2019 at the Laverlochère site, temperatures were cooler and rainfall was more abundant than in the spring of 2020, when temperatures were higher, but rainfall was about 40% lower (Table 6). It is possible that these conditions caused an increase in evapotranspiration and water stress in wheat in the spring of 2020 and negatively affected its yield (Day & Intalap, 1970; Gupta et al., 2001). In contrast, at the Poularies site in 2019, the number of degree days in May was half the average and precipitation in June was 50% higher than average, while in 2020, the number of degree days in May and June was slightly higher and precipitation in June was similar to average. The lack of heat at the beginning of the season, combined with the excessively wet conditions, may have slowed germination and adversely affected oat cultivation at Poularies in 2019, leading to negative effects on yields compared to those in 2020 (Sulaiman et al., 2023; Figueroa-Pérez et al., 2024).

By way of comparison, the reference yields determined by the provincial farm credit institution La Financière Agricole du Québec were 2.74 Mg ha⁻¹ for conventionally grown wheat in 2019 and 2020 for the Laverlochère region, and 1.59 and 1.68 Mg ha⁻¹ in 2019 and 2020 for conventionally grown oats in the Poularies region (FADQ, 2019; FADQ, 2020). Wheat yields at the Laverlochère site were 35% higher in 2019 and 26% lower in 2020 relative to the reference yields. At the Poularies site, oat yields were approximately 50% lower in 2019 and 33% lower in 2020 relative to the reference yields (FADQ, 2019; FADQ, 2020). Several studies comparing cereal yields by production method show that organic yields are usually lower than conventional yields (Entz et al., 2001; Mason and Spaner, 2006; Mäder et al., 2007). This can be explained mainly by the higher nutrient deficit and greater competition for resources with weeds in organic production than in conventional production (Mason and Spaner, 2006). Another possible explanation is the absence of chemical or mechanical weed control methods in our experiment. Including a weed-free control (manually weeded plots) could provide further insights into the specific effect of weed competition.

Although legume intercrops can provide nutrients and increase crop yields, this is not a universal phenomenon (Abdallahi et al., 2000; N'Dayegamiye et al., 2015; Verret et al., 2017; Bourgeois et al., 2022). Our results show that legumes intercrops had neither positive nor negative impact on yields; wheat and oat crops were not affected by competition with legume intercrops. This observation is consistent with the results of a meta-analysis by Verret et al., (2017), which shows no effect of cover crops planted at sowing or during the active growth of straw cereals. One reason for this phenomenon could be related to the soil organic carbon (SOC) levels at our study sites. The positive effect of cover crops on yields is more pronounced in soils poor in SOC (i.e., $<12 \text{ g C kg}^{-1}$) (Bourgeois et al., 2022; Vendig et al., 2023). Soils rich in organic matter, such as those at our study sites, contain sufficient nutrients for cereals (Mullen et al., 1998; Bourgeois et al., 2022).

3.6.2 Weed biomass

Overall, our results confirm that the legume intercrops planted exerted competitive pressure on weeds (Gardarin et al., 2022), reducing weeds' biomass production by 50% compared to the weedy control without intercrops. This was particularly evident at the Laverlochère and Poularies sites in 2019, where the legume intercrops, regardless of the type, produced biomass representing more than 90% of the total inter-row biomass. Our results are consistent with those of other studies showing that intercropping significantly reduces weed biomass (Liebman and Dyck, 1993; Verret et al., 2017), particularly when legumes are intercropped with cereal crops such as wheat or oats (Hartl et al., 1989). The suppressive effect of intercrops on weeds could be related to their ability to intercept light, and this effect would be more pronounced, particularly against large weeds, when light interception occurs early in the growing season (Kruidhof et al., 2008). Thus, the faster an intercrop establishes itself and produces a significant amount of biomass, the more it will cover the soil and have a suppressing effect on weeds (Liu et al., 2022; Gardarin et al., 2022).

The crimson clover treatment in Poularies in 2020 was particularly effective in reducing the amount of weed biomass, accounting for a larger proportion of the total biomass in the inter-row than yellow sweet clover and white clover (although the differences

with the latter were not significant). This could be explained by the fact that the crimson clover was taller and had a larger leaf area than yellow sweet clover and white clover in Poularies in 2020 (Chida et al., 2026). In addition, the specific length of its roots may be greater than that of the other two species (Guerrero-Ramírez et al., 2020). These traits are characteristic of competitive and resource-acquiring species (Garnier et al., 2016; Roumet et al., 2016; Cordeau and Moreau, 2017). This could give crimson clover its ability to effectively combat weeds that severely infest crops (Abdin et al., 2000), as was the case in Poularies in 2020, where weeds were much more abundant than in 2019.

The sowing time interacted with the type of intercropped legume to influence the amount of biomass produced by weeds at the Laverlochère site in 2020. Planting at sowing occurs approximately 3–4 weeks earlier than planting at the tillering stage and provides additional growing time for intercrops, which can translate into a competitive advantage against weeds (Gardarin et al., 2022). The passage of agricultural machinery at the tillering stage can also slightly disturb the soil and expose weed seeds to light and moisture, which can promote the germination of the most opportunistic species (Travlos et al., 2020). Despite warm temperatures and low rainfall at the Laverlochère site in the spring of 2020, the crimson clover planted at sowing was able to take advantage of this growth period due to its strategy of rapid resource acquisition (see above), which resulted in a greater decrease in weed biomass than when it was planted at the tillering stage, especially since the sowing rate at tillering was reduced by mistake. The sowing time for red clover did not affect the weed biomass, which was reduced, as it was under crimson clover planted at sowing. Red clover is able to establish itself quickly and tolerates several types of soil conditions (Vanasse et al., 2022). Light penetration through the canopy and soil moisture content are the two main factors influencing the growth of red cover when planted as an intercrop in wheat (Queen et al., 2009). The greater access to light when red clover was planted at the same time as wheat was sown, despite the drier conditions, enabled the former to control weeds as effectively as when planted later at wheat tillering, when light penetration was lower but conditions were wetter.

3.6.3 Biomass production and N and C inputs from legumes

In line with our initial hypothesis, our results indicate that the development of above-ground biomass varies between legume intercrops. In our study, crimson clover produced the highest above-ground biomass at the Poularies site in 2019 (i.e., ~1100 kg ha⁻¹). This species also produced the most biomass at Laverlochère in 2020, but to a lesser extent (i.e., ~325 kg ha⁻¹). Values for crimson clover and white clover above-ground biomass were similar at Poularies in 2020, albeit relatively low (i.e., ~150 kg ha⁻¹), as they were at Laverlochère in 2019 (i.e., ~400 kg ha⁻¹), where they were higher than that of red clover (i.e., ~300 kg ha⁻¹), although they did not differ statistically. These amounts remain relatively low compared to the biomass produced in other unfertilized temperate agricultural systems (N'Dayegamiye et al., 2015; Abdallahi and N'Dayegamiye, 2000; Langelier et al., 2021; Vanasse et al., 2022). This can be explained by the cool climate and relatively short growing season in the Abitibi-Témiscamingue region (Table 6). In the Laverlochère and Poularies areas, the number of degree days at 0°C and growing days are approximately 2,500 and 2,250, and 185 and 175, respectively (Audet et al., 2012). To the best of our knowledge, no studies have been conducted within the same region. The scientific studies on the above-ground biomass production of legume intercrops cited above were conducted in regions south of the 47th and 46th parallels, where the number of degree days at 0°C and growing days are higher than in the Abitibi-Témiscamingue region (Audet et al., 2012).

The C/N ratio of the biomass of crimson clover planted at sowing was higher at the Laverlochère site in 2020. This could be explained, on the one hand, by the fact that cover crops planted at sowing benefit from a longer growing period. Their plant tissues are therefore more mature and consequently enriched in C and lignin (Ranells and Wagger, 1992; Singh et al., 2020; Zhu and Barros, 2025) compared to the less mature tissues of cover crops planted at tillering. On the other hand, crimson clover tends to produce many stems (Lloveras and Igelsias, 2001), which have a higher C/N ratio than leaves (Quemada and Cabrera, 1995). Our results, which show that the above-ground biomass of red and white clover planted at sowing is richer in N and has a lower C/N

ratio than that of crimson clover, are consistent with those in other studies (Brandsæter et al. 2008; Anugroho et al., 2010; Rohwer, 2025). A higher C/N ratio generally results in slower decomposition of plant biomass in the soil and slower release of the N it contains (Truong and Marschner 2018). Therefore, this suggests that the above-ground biomass of crimson clover may decompose more slowly than that of red and white clover, particularly when planted at sowing. However, the C/N ratios measured in our study remain relatively low (i.e., $C/N < 20$) and are comparable to those of other legume intercrops (Cicek et al., 2014). The decomposition of above-ground biomass should not cause N immobilization in the soil (Tisdale et al., 1985; Trinsoutrot et al., 2000; Johnson et al., 2007; Thilakarathna et al., 2015).

The amounts of N contributed annually by legume intercrops in our study (i.e., between ~ 5 and ~ 25 kg N ha⁻¹) are relatively low, which could also explain the lack of effect on cereal yields noted above (Bourgeois et al., 2022). Overall, crimson clover was the species that contributed the most N, particularly at the Poularies site in 2019, followed by white clover. This effect is related more to the species' production of above-ground biomass than to the N concentration in this biomass. Although limited, the amount of N provided by legume intercrops helps to replenish the mineralizable N stocks in soil organic matter (SOM) (N_{SOM}, kg N ha⁻¹). According to N'Dayegamiye et al., (2007), these stocks can be estimated using the equation $N_{SOM} = MVA \times P \times [N] \times K_2 \times 10,000$, where P is the soil depth considered (in m), [N] is the total N concentration in the soil (in g kg⁻¹), K₂ is the mineralization coefficient of the SOM, and 10,000 is the conversion factor from m² to ha. According to Clément et al., (2010), the K₂ coefficients are 0.87 and 0.77% year⁻¹ for the soil and climate conditions at the Laverlochère and Poularies sites, respectively. The amount of mineralizable N in the SOM in the top 15 cm of soil is therefore equivalent to approximately 71 and 53 kg N ha⁻¹ at the Laverlochère and Poularies sites, respectively. Thus, the amount of N provided by legume intercrops is equivalent to approximately 10 to 30% of that provided annually by SOM mineralization.

As with N, the amount of C contributed annually by above-ground biomass is generally higher for crimson clover, followed by white clover. Overall, these amounts are fairly

low (i.e., ~70 to ~450 kg C ha⁻¹) compared to the values obtained in some studies, although they are comparable to the values obtained in others (Abdallahi and N'Dayegamiye 2000; N'Dayegamiye et al., 2015; McClelland et al., 2021). However, reduced amounts of C supplied by cover crop biomass can lead to gains in soil organic C (Poeplau and Don 2015; McClelland et al., 2021), although this impact may be limited in heavy-textured soils that are initially rich in C, such as those in our study (McClelland et al., 2021; Georgiou et al., 2025). Nevertheless, the above-ground biomass produced by legume intercrops is rich in N, and the C it contains can be efficiently utilized by soil microorganisms (Cotrufo et al., 2013), thereby contributing to soil health (Banerjee and van der Heijden, 2023). One aspect of organic farming that is often overlooked is the contribution of weeds, which also add C and N to the soil. Although this issue was not examined in this study, we believe that it warrants further investigation in future research on the topic.

3.7 Conclusion

This study revealed that the introduction of legumes as an intercrop in organic cereal crops has no influence on yields, regardless of sowing time. However, the legume intercrops differed in their agri-environmental potential. Crimson clover proved to be more effective in terms of the amount of above-ground biomass produced and was able to significantly limit weed growth, while red clover and white clover produced N-rich above-ground biomass with low C/N ratios conducive to rapid decomposition, but in relatively smaller quantities. The impact of yellow sweet clover proved to be marginal. The sowing time had a positive impact, to a lesser extent, on the concentrations and quantities of C and N provided by certain legume intercrops.

Overall, these results highlight the importance of species and cultivation practice selection in optimizing the benefits of legume intercrops in organic cereal systems. In a context where optimizing the biodiversity of agroecosystems is becoming increasingly necessary in the eyes of civil society and the agricultural world, the introduction of legume intercrops is an effective solution for reducing the use of plant protection products and synthetic inputs. However, in order to raise awareness among agricultural businesses and maximize the adoption of this practice, it is necessary to

continue research under real farm conditions, as we have done, and to explore the subject in greater depth. The inclusion of economic profitability indicators, longer term monitoring, and trials involving a variety of cover crop species planted alone and in mixtures are avenues of research that should be explored in the future.

4. INFLUENCE DES LÉGUMINEUSES INTERCALAIRES ET DU MODE D'IMPLANTATION SUR LA BIOMASSE RACINAIRE ET LES PROPRIÉTÉS PHYSICOCIMIMIQUES DU SOL EN CULTURES CÉRÉALIÈRES BIOLOGIQUES

Ce chapitre sera traduit dans les semaines suivant le dépôt final de la thèse et fera l'objet d'une soumission ultérieure dans une revue scientifique à déterminer.

Insaf Chida¹, Noura Ziadi², et Vincent Poirier^{1*}

¹Agriculture and Agri-Food Research Institute, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Notre-Dame-du-Nord, QC J0Z 3B0, Canada

²Quebec Research and Development Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Québec, QC G1V 2J3, Canada

*Author to whom correspondence should be addressed.

4.1 Résumé

L'intégration des cultures de couvertures de légumineuses dans les cultures céréalières biologique est utile pour faire face aux enjeux liés à la fertilisation du sol et à la lutte contre les adventices. Notre objectif était d'évaluer l'impact de légumineuses intercalaires implantées au semis et au tallage, sur la composition chimique des racines, la biomasse racinaire produite et les stocks de C et d'N associés ainsi que sur certaines propriétés indicatrices de l'état de santé des sols (masse volumique apparente, porosité, stabilité des agrégats et stocks de C et N du sol). Deux dispositifs expérimentaux furent implantés en Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada) durant deux années consécutives (i.e., 2019 et 2020), l'un à Poularies dans une culture d'avoine biologique et l'autre à Laverlochère dans une culture de blé biologique. Chaque site incluait quatre traitements et deux modes d'implantation (i.e., au semis et au tallage). À Laverlochère, les traitements consistaient en trois légumineuses intercalaires : trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), trèfle rouge (*Trifolium pratense*) et trèfle blanc (*Trifolium repens*) ainsi qu'un témoin sans légumineuse. À Poularies, ils comprenaient : le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*), le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), le trèfle blanc (*Trifolium repens*), et un témoin. Dans l'ensemble, nos résultats montrent que le mode d'implantation influence significativement la densité et la composition chimique des racines, avec un semis précoce favorisant une biomasse racinaire plus dense, une teneur plus élevée en azote et en composés solubles et un rapport C/N plus faible. Le trèfle blanc s'est démarqué par sa capacité à enrichir le sol en C et N, même lorsque sa biomasse aérienne était faible, en revanche le trèfle incarnat a amélioré la stabilité physique du sol, en particulier par la formation de macroagregats. Ces effets montrent que la combinaison de trèfle blanc et de trèfle incarnat pourrait représenter une stratégie complémentaire pour maximiser la fertilité et la structure des sols. Ce qui souligne l'importance d'un choix judicieux d'espèce et de mode d'implantation pour optimiser les services écosystémiques des légumineuses intercalaires en production céréalière biologique.

Mots-clés : agriculture durable, légumineuses intercalaires, enherbement, biomasse racinaire, carbone, azote, fertilité du sol, structure du sol, macroagregats.

4.2 Abstract

The integration of legume cover crops into organic cereal crops is useful for addressing issues related to soil fertilization and weed control. Our objective was to evaluate the impact of legumes intercropped at sowing and at tillering on root chemical composition, root biomass production, and associated carbon and nitrogen stocks, as well as on certain properties indicative of soil health (bulk density, porosity, aggregate stability, and soil carbon and nitrogen stocks). Two experimental plots were established in Abitibi-Témiscamingue (Quebec, Canada) for two consecutive years (i.e., 2019 and 2020), one in Poularies in an organic oat crop and the other in Laverlochère in an organic wheat crop. Each site included four treatments and two planting methods (i.e., at sowing or at tillering). At Laverlochère, the treatments consisted of three intercropped legumes: crimson clover (*Trifolium incarnatum*), red clover (*Trifolium pratense*), and white clover (*Trifolium repens*), as well as a control without legumes. At Poularies, they included yellow sweet clover (*Melilotus officinalis*), crimson clover (*Trifolium incarnatum*), white clover (*Trifolium repens*), and a control. Overall, our results indicate that the planting method significantly affects root density and chemical composition, with early sowing promoting greater root biomass, higher nitrogen and soluble compound content, and a lower carbon-to-nitrogen (C/N) ratio. White clover stood out for its ability to enrich the soil with carbon and nitrogen, even when above-ground biomass was low, whereas crimson clover improved soil physical stability, particularly through the formation of macroaggregates. These results suggest that combining white clover and crimson clover could be a complementary strategy for maximizing soil fertility and structure. This highlights the importance of carefully selecting species and planting methods to optimize the ecosystem services provided by intercropped legumes in organic cereal production.

Keywords: Sustainable agriculture, intercropped legumes, grass cover, root biomass, carbon, nitrogen, soil fertility, soil structure, macroaggregates.

4.3 Introduction

L'agriculture durable repose sur des approches écologiques destinées à protéger les ressources naturelles, comme l'eau, les sols et surtout à préserver la biodiversité, tout en assurant une productivité économiquement viable (Kaspar et Singer, 2011). Dans les écosystèmes céréaliers des régions froides, tels que l'Abitibi et le Témiscamingue, cette durabilité est surtout testée par des conditions pédoclimatiques particulières : saisons de croissance courtes, dangers cumulés de la compaction du sol et vulnérabilité à l'érosion (IRDA, 2023 ; MAPAQ, 2023). Ces contraintes justifient le développement des pratiques culturales qui améliorent la santé des sols sans recourir systématiquement aux intrants de synthèse suscitent un intérêt croissant.

Parmi ces pratiques, l'enherbement, qu'il soit spontané ou semé, occupe une place prépondérante dans les pratiques agricoles contemporaines en raison de ses effets diversifiés et de ses multiples services écosystémiques (Blanco-Canqui et Lal, 2007 ; Smith et Gross, 2007). Ces couverts génèrent une biomasse aérienne et racinaire capable de contribuer significativement à l'amélioration de la structure du sol, à la séquestration du carbone, à la réduction de l'érosion et au soutien à la biodiversité microbienne (Berg et al., 2014 ; Gaba et al., 2018 ; Jiang et al., 2020). La diversité des services attendus des couverts semés s'étend au-delà de leur simple rôle en tant que stabilisateurs du sol. Ils sont reconnus pour leur capacité à lutter contre les adventices, à réguler les ravageurs, à améliorer la rétention d'eau dans le sol et agissent comme des filtres naturels pour préserver la qualité de l'eau (Blanco-Canqui et al., 2015 ; Stoate et al., 2017). Les espèces de la famille des légumineuses (Fabaceae) peuvent être utilisées comme cultures de couverture en production céréalière principalement en raison de leur capacité à fixer l'azote et à enrichir le sol (Lavergne et al., 2021 ; Fried et al., 2022 ; Bourgeois et al., 2022 ; Gardarin et al., 2022 ; Gomez et al., 2022). Toutefois, bien que les légumineuses aient été largement étudiées dans les rotations de cultures, peu de travaux ont comparé l'effet du mode d'implantation (semis vs tallage) et des différentes espèces intercalaires comme : les trèfles rouge (*Trifolium pratense*), blanc (*Tr. repens*), le trèfle incarnat (*Tr. incarnatum*) et le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*) sur la fertilité et la structure des sols dans les conditions spécifiques des régions froides. Des récents travaux ont souligné le rôle des racines

des cultures intercalaires dans l'accumulation du carbone organique, favorisant la structuration du sol et la rétention de matière organique stable (Jones et al., 2023 ; Pisarčík et al., 2024). Dans le même sens, Haruna et al., (2023) ont montré que l'utilisation de trèfle incarnat en intercalaire augmente significativement la conductivité hydraulique saturée et améliore la disponibilité en eau pour les cultures subséquentes. De même, l'étude de Lieskamp et al., (2024) a révélé que cette légumineuse intercalaire permet non seulement de stimuler l'activité biologique mais aussi de réduire la densité apparente du sol, renforce la macroporosité et stimule l'activité biologique du sol. Le trèfle incarnat dans les rotations céréalières a permis de produire une biomasse racinaire et aérienne significative ce qui a favorisé l'amélioration de la structure et la fertilité du sol (Snapp et al., 2005).

Il apparaît aussi que les cultures intercalaires contribuent pareillement à enrichir la biodiversité fonctionnelle des sols, par le fait d'une plus grande diversité microbienne et faunique, essentielle pour la résilience agroécologique (Sullivan et al., 2024). L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de différentes modalités d'enherbement sur certaines propriétés physicochimiques du sol, en portant une attention particulière aux conditions agroclimatiques des régions d'Abitibi et du Témiscamingue (Quebec, Canada). L'évaluation a porté sur des indicateurs liés à la structure et à la compaction du sol, à sa fertilité, ainsi qu'à la qualité et à la quantité de matière organique présente. Par ailleurs, une attention particulière a été accordée aux liens potentiels entre ces propriétés du sol et les traits fonctionnels des parties aériennes des légumineuses utilisées comme espèces intercalaires. Deux principales hypothèses ont sous-tendu cette recherche. La première postulait que, comparativement à une parcelle témoin sans enherbement, l'introduction d'espèces intercalaires aurait un effet avantageux sur les propriétés physicochimiques du sol. En d'autres termes, l'implantation volontaire de couverts végétaux était anticipée comme une stratégie d'amélioration des fonctions pédologiques. La seconde hypothèse avançait que le trèfle incarnat pourrait accroître la stabilité de la structure du sol, notamment en améliorant la cohésion des agrégats, en comparaison avec d'autres espèces intercalaires.

4.4 Matériels et méthode

4.4.1 Présentation des sites d'études

Cette étude a été menée sur deux années consécutives (2019 – 2020) sur deux sites distincts. Le premier site était situé en Abitibi-Ouest, dans la municipalité de Poularies (48°39'41.5"N, 79°01'03.8"O), dans un champ cultivé en avoine pendant toute la durée de l'expérience. Le climat y est continental froid et humide, correspondant à la classification Dfb de Köppen (Peel et al., 2007). Durant cette période, les températures moyennes ont varié d'environ 6,9 à 19,7 °C entre mai et septembre. Les précipitations sont modérées, oscillant entre 41 et 133 mm par mois (Environment and Climate Change Canada, 2020). Le site d'étude est implanté sur un sol de type argile lourde de la série Roquemaure. Les sols de cette série sont caractérisés par un mauvais drainage, contiennent typiquement ~900, ~100 et ~0 g kg⁻¹ d'argile (<2 µm), de limon (2-50 µm) et de sable (50-2000 µm), respectivement, dans l'horizon superficiel (i.e., 0-30 cm de profondeur), et sont classés comme des Gleysols humiques d'après le Système canadien de classification des sols (Rompré et Carrier, 1997 ; Groupe de travail sur la classification des sols, 2002). La topographie de la région est relativement plane, le site étant situé au sein d'une vaste plaine d'argile à environ 300 m d'altitude (Blanchard, 1954).

Le deuxième site se trouvait à Laverlochère (Témiscamingue, Québec, Canada ; 47°25'35" N, 79°18'27" O), où une culture de blé biologique a été cultivée durant les deux années de l'étude. Le climat y est continental humide, correspondant à la classification Dfb de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Les températures moyennes ont varié entre 8,6 à 20,7 °C, et les précipitations mensuelles ont été modérées, allant de 51 à 136 mm. Le cumul des degrés-jours base 5 °C, de 173 à 412, illustre une saison de croissance relativement courte mais favorable au développement des cultures (Environment and Climate Change Canada, 2020). Le sol est caractérisé par un horizon d'accumulation d'argile dans le sous-sol, généralement appelé horizon Bt (Rompré et Carrier, 1997). Les eaux de fonte glaciaire ont laissé des dépôts d'argiles lourdes, formant des varves avec des couches alternées claires et foncées. Cette

enclave argileuse favorise la croissance et le rendement des cultures, mais elle rend le sol compact. Les agriculteurs ont développé des pratiques spécifiques de culture, incluant le drainage, le nivellement et des choix et rotations de cultures adaptés à ces caractéristiques particulières du sol. Dans le cadre de cette étude, des légumineuses ont été implantées en intercalaire à deux moments clés de la culture de céréales : au semis et au stade de tallage. Le semis a été réalisé à l'aide d'un semoir à céréales de marque John Deere. Les essais réalisés en 2019 et 2020 à Poularies et Laverlochère comprenaient les deux modes d'implantation (semis et au tallage) , combinés à quatre traitements , soit (1) le mélilot jaune (*Melilotus officinalis*), (2) le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) et (3) le trèfle blanc (*Trifolium repens*) semé en intercalaires et (4) un témoin à Poularies; (1) trèfle blanc (*Trifolium repens*), (2) le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) et (3) le trèfle rouge (*Trifolium pratense*) et (4) un témoin sans légumineuses à Laverlochère. Chaque site comportait deux blocs expérimentaux, soit un total de 16 parcelles, avec deux répétitions nichées par parcelle. Un seul horizon de sol fût échantillonné dans chacune d'elles. Les trèfles blanc, rouge et incarnat et le mélilot jaune ont été semés aux doses de 6, 8, 15 et 5 kg ha⁻¹ pour l'implantation au semis et de 8, 12, 25 et 15 kg ha⁻¹ pour l'implantation au tallage, respectivement, mise à part l'implantation du trèfle incarnat au tallage à Laverlochère en 2020 où la dose fut de 6 kg ha⁻¹ par erreur. Les légumineuses implantées au tallage ont été semées à la volée, l'ont été aux stades 21 (début tallage) et 23 (3 talles visibles) de l'échelle Zadock à Poularies et Laverlochère, respectivement. Un bris de machinerie n'a pas permis d'implanter les parcelles au tallage à Poularies en 2019. Les essais ont été implantés au même endroit et selon les mêmes modalités en 2019 et 2020. Les conditions climatiques et les dates des travaux réalisés sur le terrain sont présentées aux Tableaux 6 et 7.

4.4.2 Échantillonnage et analyses des racines

En 2019, les échantillons pour les analyses de racines ont été prélevés dans l'horizon superficiel entre 0 et 6 cm de profondeur à l'aide de cylindres de 6 cm de diamètre. Un échantillon composite a été formé à partir de quatre prélèvements par parcelle. En 2020, les échantillons ont été prélevés à 15 cm de profondeur à l'aide d'un carottier

manuel de 7,9 cm de diamètre. Cette différence entre les deux années résulte d'ajustements méthodologiques. En raison de ces variations dans les protocoles, les données ont été analysées séparément pour chaque année, limitant les comparaisons directes interannuelles. Les échantillons ont été placés dans une salle de lavage, fragmentés et trempés dans un agent dispersant pendant 12 à 15 heures. Les racines ont ensuite été extraites à l'aide d'un laveur mécanique de racines type Gillison's Root Washer (Gillison's Variety Fabrication, Inc.), permettant un lavage uniforme tout en minimisant la perte de racines fines. Les blocs de sol prélevés ont été placés dans le tambour rotatif, où un flux constant d'eau désagrégeait progressivement le sol sans endommager les tissus racinaires. Les particules de sol étaient évacuées par filtration, tandis que les racines étaient retenues par flottaison et tamisage (250 μm), avant d'être séchées, pesées et broyées. Cette méthode automatisée a permis un traitement standardisé, efficace pour de grands volumes d'échantillons (Trachsel et al., 2011). Les racines ont ensuite été récupérées manuellement à l'aide de pinces fines, rincées à l'eau distillée et analysées morphologiquement à l'aide du logiciel WinRHIZO™ (Regent Instruments Inc.). Elles ont été séchées à 65 °C pendant 72 h puis broyées pour déterminer la biomasse sèche. Des sous-échantillons ont été utilisés pour l'analyse biochimique : le carbone (C) et l'azote (N) totaux ont été déterminés par combustion sèche selon la méthode de Dumas (Dumas et al., 1996) à l'aide d'un analyseur élémentaire. Les composés solubles, l'hémicellulose, la cellulose et la lignine ont été quantifiés selon la méthode de Van Soest et al., (1991).

4.4.3 Échantillonnage et analyses du sol

Les sols ont été échantillonnés à la fin de la saison de croissance des légumineuses, avant le labour. Un échantillon de sol frais a été pesé puis séché à l'étuve pour déterminer les propriétés physiques ciblées : masse volumique apparente (MVA, g cm^{-3}), porosité du sol (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), proportion de macroagrégats ($> 250 \mu\text{m}$, g kg^{-1}), et diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau (DMP, mm). Pour la MVA, des échantillons ont été prélevés à l'aide de cylindres métalliques de 100 cm^3 et séchés à 105 °C pendant 48 heures. La masse sèche obtenue a été rapportée au volume du cylindre (Grossman et Reinsch, 2002). Une valeur élevée de MVA indique

un sol compacté, limitant l'infiltration de l'eau et la croissance racinaire (Reynolds et al., 2009). Des valeurs supérieures à $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ peuvent restreindre le développement racinaire et la circulation de l'eau (Hillel, 2004; Lipiec et al., 2012).

La porosité totale a été calculée selon :

$$\theta = 1 - \frac{MVA}{\rho_s}$$

Où θ est la porosité (volume de vide par volume total), MVA la masse volumique apparente, et ρ_s la densité des particules solides (Reynolds et al., 2009). Cette mesure représente la proportion de cavités dans le sol, un paramètre essentiel pour l'aération, la circulation de l'eau et la croissance racinaire.

Pour la stabilité des agrégats nous nous sommes basés sur le principe que les agrégats se désagrègent lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, alors que les agrégats stables résistent à la désagrégation (Kemper et Rosenau, 1986). L'évaluation a été effectuée sur des échantillons de sol secs, préalablement tamisés à 8 mm. Le contenu complet du sol a été versé dans une assiette en aluminium pour former une petite pyramide, puis mélangé manuellement afin de répartir uniformément les agrégats. Un prélèvement représentatif d'environ 20 g a été prélevé.

Inspirés par la méthode de Poirier et al., (2018), nous avons utilisé un dispositif à mouvement oscillatoire dont lequel les agrégats ont été séparés en cinq classes granulométriques (8–5 mm, 5–2 mm, 2–1 mm, 1–0,5 mm et 0,5–0,25 mm) à l'aide de tamis immergés dans l'eau. Après oscillation verticale contrôlée pendant 10 minutes à une fréquence de 29 va-et-vient par minute et avec une amplitude de 3,7 cm, les fractions ont été rincées, récupérées dans des béchers de 150 ml identifiés, puis séchées à 55 °C jusqu'à dessiccation complète. La masse sèche de chaque fraction a été déterminée pour quantifier la distribution des agrégats stables à l'eau. Enfin, les particules fines (< 0,25 mm) ont été éliminées après décantation. Le diamètre moyen pondéré (DMP, mm) a été calculé en multipliant la taille moyenne de chaque classe granulométrique par la fraction pondérale (fraction massique) de cette classe dans l'échantillon total selon Bissonnais (1996) :

$$DMP = \sum (x_i \times w_i)$$

Où x_i est le diamètre moyen de la classe granulométrique i , et w_i est la proportion pondérale (masse sèche de la classe i divisée par la masse totale des agrégats stables). Cette méthode permet de synthétiser la distribution granulométrique des agrégats en une valeur unique qui reflète la stabilité structurale globale du sol.

Par la suite, des analyses chimiques ont été effectuées en prenant pour cible les concentrations en azote total et en carbone du sol (exprimées en g C ou N kg⁻¹ sol) afin de calculer les stocks de ces éléments retrouvés dans le profil des sols aux profondeurs échantillonnées ainsi que leur rapport C/N, indicateur de la qualité de la matière organique et du cycle de décomposition. Pour mesurer les concentrations en N et en C du sol, nous avons utilisé un analyseur élémentaire à combustion sèche (Vario MAX cube, Elementar Analysensysteme GmbH). Les stocks de C et N ont été calculés en multipliant la concentration respective par la MVA, l'épaisseur de la couche de sol et un facteur de conversion (0,1) (Jastrow et al., 2021).

4.4.4 Analyses statistiques

Le modèle statistique utilisé pour l'analyse des données repose sur un modèle linéaire mixte, avec les facteurs « légumineuse » (4 niveaux) ainsi que « le mode d'implantation » (2 niveaux). Ces facteurs de même que leurs interactions sont des termes fixes dans le modèle, alors que les termes « bloc » et « bloc*légumineuse » composent la partie aléatoire du modèle. En présence d'interactions significatives entre facteurs fixes, ce modèle offre la possibilité d'examiner les variations entre niveaux d'un facteur en fonction des niveaux de l'autre. L'un des avantages majeurs de ce modèle réside dans sa capacité à effectuer ces comparaisons en réduisant l'influence des variations entre blocs.

Les analyses ont été réalisées séparément pour chaque site et pour chaque année, afin de tenir compte des différences dans les méthodes d'échantillonnage.

Nous avons réalisé une analyse de la variance (ANOVA) à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute, 2023) pour tester l'effet des traitements de légumineuses intercalaires, des modes d'implantation et de leurs interactions sur les

variables : soit la composition chimique des racines, les stocks de carbone et d'azote racinaires ainsi que les propriétés physiques et chimiques du sol.

La normalité des résidus et l'homogénéité des variances ont été vérifiées à l'aide des procédures PLOT et UNIVARIATE du logiciel SAS (SAS Institute 2023) . Les données ont subi des transformations logarithmiques, racine carrée ou de rang lorsque nécessaire pour respecter les postulats de l'ANOVA. Lorsque l'ANOVA indiquait des différences significatives ($p < 0,05$), des comparaisons multiples des moyennes ont été réalisées à l'aide du test de la plus petite différence significative (LSD) de Fisher afin d'identifier les différences entre les traitements.

Tous les tests statistiques ont été réalisés avec un seuil de signification de $\alpha = 5 \%$.

4.5 Résultats

Nos résultats montrent plusieurs effets significatifs des traitements sur la composition chimique des racines, la production de biomasse racinaire et les propriétés indicatrices de l'état de santé du sol. Les racines analysées proviennent de la communauté végétale couvrant le sol dans l'entre-rang. Les racines des légumineuses intercalaires n'ont pas été distinguées de celles des adventices.

4.5.1 Composition chimique des racines et biomasse racinaire

Les effets des traitements sur la composition chimique des racines, la biomasse racinaire produite et les stocks de C et d'N racinaires sont présentés aux tableaux 9 et 10 . En 2019, à Poularies, les racines du trèfle blanc présentaient une composition plus riche en azote et en composés solubles, avec une teneur réduite en hémicellulose et un rapport C/N plus faible comparé au trèfle incarnat et au témoin (Tableau 10). En revanche, à Laverlochère, les racines du trèfle incarnat qui a été implanté au semis étaient plus riches en carbone et avaient un rapport C/N plus élevé, tandis que celles du trèfle blanc implanté au tallage étaient enrichies en cellulose (Tableau 10). En outre, une densité de masse racinaire plus élevée était observée dans les parcelles implantées au semis (Tableau 10), ce qui se traduisait par des apports plus importants de carbone et d'azote (Tableau 10, Fig. 11). En 2020, les effets étaient plus marqués à Poularies. Le mode d'implantation au semis favorisait une augmentation de la

lignine, une baisse du rapport C/N et un enrichissement en azote que celle implanté au tallage (Tableau 11). Il a été relevé que les racines des parcelles sous le trèfle blanc sont enrichies en composés solubles et appauvries en hémicellulose (Tableau 11). Malgré une faible présence de biomasse aérienne de trèfle blanc dans l'entre-rang, la densité racinaire était plus élevée dans les parcelles implantées au semis. (Tableau 11, Fig. 12).

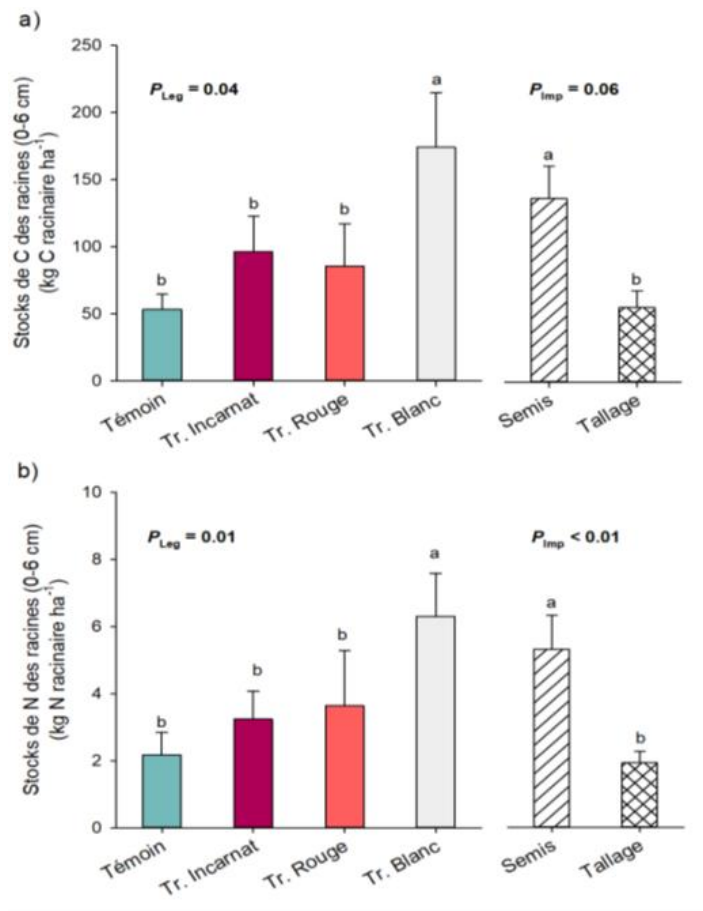


Figure 11 Stocks de carbone (C) (a) et d'azote (N) (b) de la biomasse racinaire retrouvée dans l'entre-rang entre 0 et 6 cm de profondeur à Laverlochère en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses (P_{Leg}) et du mode d'implantation (P_{imp}) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les moyennes diffèrent

significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

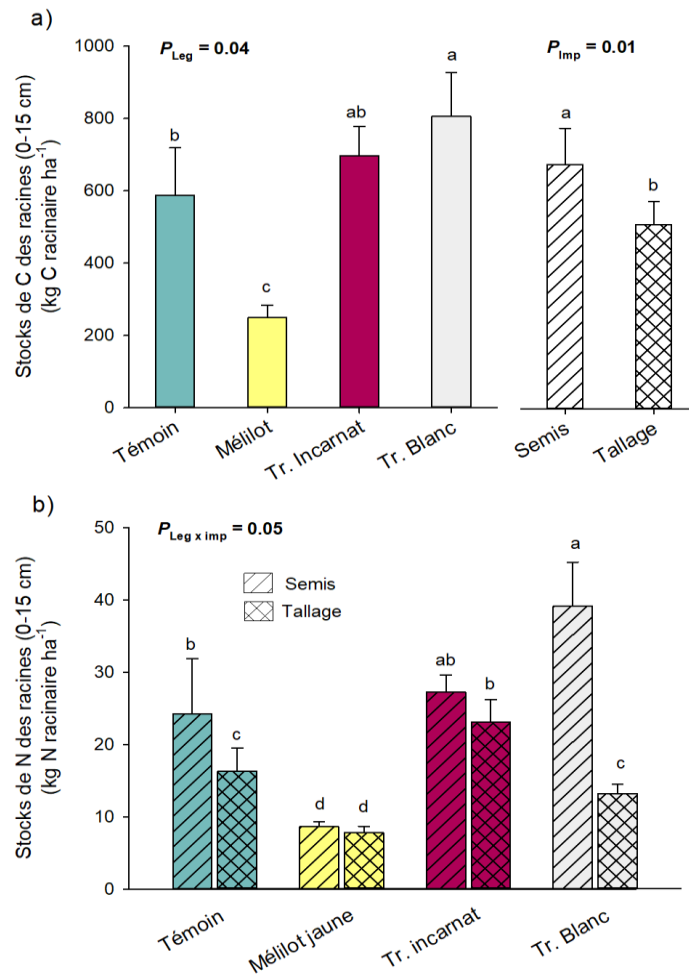


Figure 12 Stocks de carbone (C) (a) et d'azote (N) (b) de la biomasse racinaire dans l'entre-rang entre 0 et 15 cm de profondeur à Poularies en 2020. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses (P_{Leg}) $\times$ Imp) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

4.5.2 Propriétés indicatrices de l'état de santé des sols

Les tableaux 12 et 13 montrent les effets des traitements sur les propriétés des sols en 2019 et 2020. En 2019, les concentrations en carbone et en azote ainsi que le pourcentage de matière organique étaient plus élevés sous le trèfle blanc que sous le trèfle incarnat particulièrement à Laverlochère lorsque le trèfle blanc était implanté au semis (Tableau 12, Figure 13).

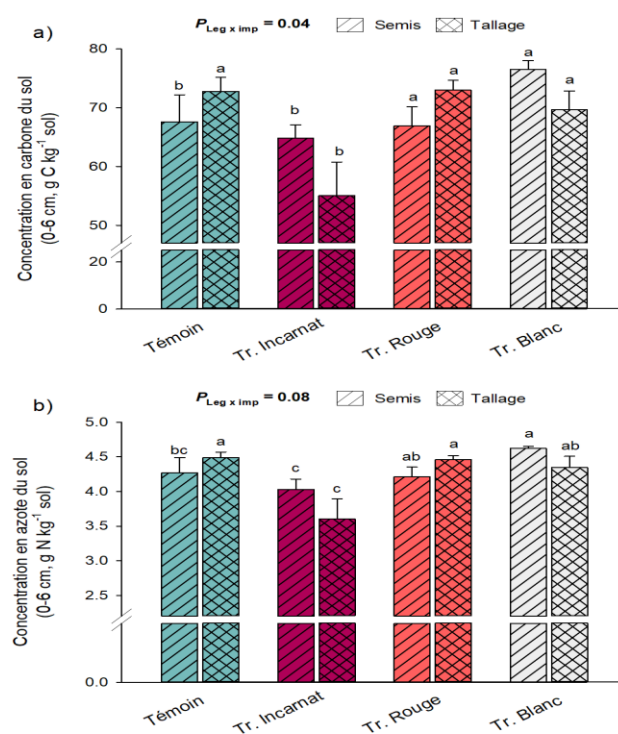


Figure 13 Concentrations en carbone (C) (a) et en azote (N) (b) du sol dans l'entre-rang entre 0 et 6 cm de profondeur à Laverlochère en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Les probabilités des effets des légumineuses (P_{Leg}), du mode d'implantation (P_{Imp}) et de leurs interactions ($P_{Leg \times Imp}$) sont présentées au-dessus des graphiques. Des lettres distinctes indiquent que les

moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

En revanche, les traitements n'ont pas eu d'effets significatifs sur les stocks de C et de N du sol cette année-là. En 2020 à Poularies, l'implantation du trèfle blanc au tallage a montré un effet bénéfique sur le sol avec une réduction de la masse volumique apparente, une augmentation de la porosité totale ainsi qu'une hausse des concentrations en C et en N (Tableau 13). Toutefois, ce trèfle ne représentait que 25 % de la biomasse végétale de l'entre-rang, le reste étant principalement composé d'adventices (Tableau 9), rendant l'attribution de ces effets incertaine.

À Laverlochère, bien que seul le trèfle incarnat implanté au semis et en intercalaire ait bien réussi pour occuper la majeure partie de la biomasse végétale (Tableau 9), pourtant les concentrations en C, N et les stocks en azote y étaient parmi les plus faibles (Tableau 13). Par ailleurs, les effets des traitements sur les agrégats stables à l'eau sont présentés dans les Tableaux 14 et 15.

Pour la stabilité structurale, en 2019 à Poularies, le trèfle blanc a favorisé la formation de macroagrégats de 2-4 mm, contribuant à une amélioration de la structure du sol au détriment des agrégats de plus petite taille (Tableau 14). En revanche, à Laverlochère, c'est l'implantation du trèfle incarnat au semis qui a eu le plus grand effet sur la stabilité structurale du sol, en augmentant la quantité de macroagrégats de 1-2 mm et la masse totale de macroagrégats (Tableau 14, Figure 13b).

En 2020, les effets sont moins marqués, possiblement en raison d'une moins bonne implantation des légumineuses dans l'entre-rang (Tableau 9). À Poularies, le trèfle incarnat implanté au tallage a eu un effet positif sur la masse totale de macroagrégats (Tableau 15), bien qu'il ne représente que 42 % de la biomasse végétale. À Laverlochère, la contribution des légumineuses à la biomasse végétale totale est plus importante avec l'implantation au tallage (62 %) qu'au semis (53 %) (Tableau 9). Cette différence, bien que non significative, pourrait expliquer l'augmentation observée des macroagrégats de 0.5-1 mm sous le traitement au tallage (Tableau 15). Le trèfle incarnat, qui s'est le mieux implanté à Laverlochère en 2020 à contribuer à 72 % en moyenne de la biomasse végétale retrouvée dans l'entre-rang (Tableau 9).

4.6 Discussion

4.6.1 Contribution racinaire des légumineuses à la fertilité du sol

Nos résultats ont montré que le mode d'implantation a influencé en particulier significativement le trèfle blanc dans la composition chimique des racines et les stocks de carbone et d'azote racinaires. Les racines de cette espèce implantées au semis présentaient une teneur plus élevée en azote et en composés solubles, ainsi qu'un rapport C/N plus faible. Cela confirme les constats d'Anderson et al., (2026), qui soulignent que les résidus racinaires de trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) se décomposent rapidement et libèrent de l'azote minéral dans le sol, favorisant ainsi une minéralisation efficace et une restitution rapide des nutriments aux cultures subséquentes. Nos résultats confirment notre hypothèse selon laquelle l'introduction de légumineuses intercalaires améliore la fertilité des sols par rapport aux témoins sans enherbement. La plus forte densité racinaire sous le semis pourrait s'expliquer par une durée de croissance plus longue et d'un meilleur établissement initial, favorisant ainsi l'accumulation de biomasse racinaire (Castillo et al., 2022).

La présence de racines enrichies en azote est souvent associée au fait qu'il y a une grande activité symbiotique. Des études antérieures ont démontré que la nodulation et la fixation d'azote sont maximisées lorsque les légumineuses bénéficient d'une implantation précoce et d'un bon développement racinaire, car le moment d'implantation exerce une influence majeure dans la gestion en interculture (Naudin et al., 2010 ; Mortensen et al., 2021). D'ailleurs, même si nos résultats, ont montré que la biomasse aérienne du trèfle blanc a été faible dans certaines modalités (cf. chapitre 3 / Article 2), la forte densité racinaire mesurée suggère que cette espèce peut contribuer de manière significative aux stocks de C et de N racinaires (Anderson et al., 2026). Des recherches complémentaires ont révélé que les racines du trèfle blanc, ont une certaine rémanence plus longue que les parties aériennes, ce qui contribue de manière significative à la matière organique du sol mettant comme évidence le rôle crucial que jouent les racines dans le stockage du carbone, même lorsque la biomasse aérienne est réduite (Puget and Drinkwater, 2001). Par contraste, le trèfle incarnat, bien qu'ayant une croissance aérienne rapide (cf. Chapitre 3 / Article 2) n'a pas systématiquement conduit à une densité racinaire aussi élevée dans nos

parcelles que celle du trèfle blanc, ce qui explique des effets moins marqués sur le C et N racinaires. Schlueter et Tracy (2012) ont montré que le semis précoce de trèfle entraîne une biomasse racinaire significativement plus élevée que les implantations tardives dans les prairies permanentes. Des travaux ultérieurs, confirment aussi que le semis précoce et la densité initiale des plantules favorisent la production de biomasse racinaire chez différentes légumineuses et cultures de couverture (Tracy et al., 2014 ; Zarza et al., 2020). Ces résultats soulignent l'importance d'un établissement précoce pour maximiser les apports en carbone et en azote. Ces auteurs soulignent que la réussite de l'établissement du trèfle est tributaire non seulement de la modalité de semis, mais surtout de la compétition avec les graminées déjà en place, une compétition que les légumineuses tolèrent mieux lorsqu'elles bénéficient d'un avantage chronologique dans le cycle de croissance. Ce gain en biomasse se traduit souvent par un apport accru en carbone organique rhizodéposé, bénéfique pour l'activité microbienne du sol (Saraswat et al., 2025). Par ailleurs, l'enrichissement en lignine et la baisse du rapport C/N en 2020, ont été particulièrement observés pour le trèfle blanc implanté au semis et, dans une moindre mesure, pour le trèfle incarnat, quel que soit le mode d'implantation. Ces variations peuvent refléter une adaptation des plantes à un contexte environnemental plus contraignant ou à une compétition accrue avec les adventices (Matamoros et al., 2003 ; Armengot et al., 2016).

D'autres études ont démontré que le choix des pratiques culturales influence la composition fonctionnelle des communautés adventices ce qui par conséquent peut affecter la compétition entre les cultures et les adventices et induire des adaptations biochimiques chez les plantes cultivées (Armengot et al., 2016). Ces réponses, observées au niveau des racines des légumineuses, traduisent des stratégies d'adaptation aux conditions environnementales stressantes incluant la compétition avec les adventices et la densité variable de la biomasse aérienne, renforçant les parois cellulaires, ralentissant la décomposition et favorisant la formation d'agrégats stables (Yang et al., 2024 ; Saraswat et al., 2025). De tels ajustements biochimiques ont également été de même rapportés par Peng et al., (2023), qui ont montré que le rapport C/N des plantes est un indicateur sensible aux changements

environnementaux, influençant la composition des communautés végétales, notamment en réponse à l'apport d'azote dans des prairies. Enfin, dans les prairies mixtes légumineuses–graminées, plusieurs études ont montré que le trèfle blanc peut fixer entre 13 et 682 kg N ha⁻¹ an⁻¹, avec une part significative de cet azote stockée dans les racines. Ce qui souligne encore la contribution substantielle du trèfle blanc à la fertilité du sol et à la stabilité des agrégats via ses racines (Ledgard et Steele, 1992; Gregory et al., 2009).

4.6.2 Effets des traitements sur les propriétés physicochimiques du sol

Nos résultats mettent en évidence l'importance de l'implantation et de la biomasse racinaire des légumineuses, principalement du trèfle blanc et du trèfle incarnat, dans l'amélioration des propriétés physicochimiques du sol. En 2019, la présence du trèfle blanc implanté au semis à Laverlochère a significativement augmenté les concentrations en carbone et en azote ainsi que le pourcentage de matière organique. Ceci est en accord avec les travaux de (Gregory et al., 2009 ; Ziadi et al., 2022) qui insistent sur la contribution des racines dans l'apport de la matière organique et sur la rhizodéposition de carbone. D'un autre côté, on a trouvé que le trèfle incarnat semble jouer un rôle crucial dans la stabilité physique du sol, comme en témoigne l'augmentation des macroagrégats observée, en particulier à Laverlochère en 2019.

À Poularies en 2020, le trèfle blanc implanté au tallage a réduit la masse volumique apparente et augmenté la porosité totale ainsi que les concentrations en C et N, tandis que le trèfle incarnat a amélioré la masse totale de macroagrégats, notamment lorsqu'il représentait une part importante de la biomasse végétale.

L'amélioration des agrégats favorise la porosité, l'infiltration d'eau et la résistance à la compaction, tout en contribuant à l'activité microbienne et à la minéralisation de la matière organique (Bronick et Lal, 2005 ; Six et al., 2000). Cette observation soutient notre deuxième hypothèse selon laquelle l'implantation du trèfle incarnat pourrait accroître la cohésion des agrégats et la résistance du sol à la compaction par rapport aux autres espèces intercalaires.

Bien que les recherches spécifiques sur le trèfle incarnat soient limitées, des études menées par l'institut de recherche et de développement en agroenvironnement

(IRDA), en collaboration avec le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), ont exploré la faisabilité et les effets bénéfiques du trèfle incarnat implanté en intercalaire dans les céréales à paille au Québec (Tremblay et al., 2018). Ces travaux ont mis en évidence que cette légumineuse permet une amélioration de la structure du sol par le développement et la stabilisation des agrégats grâce à la production de substances organiques exsudées par les racines. Par conséquent, ces agrégats améliorent la porosité et la résistance du sol à la compaction (Tremblay et al., 2018). Favorisant la vie microbienne contribue ainsi à une meilleure minéralisation des résidus et de la matière organique (Robert, 2016). Par exemple, Poirier et al., (2018) ont démontré que l'incorporation de résidus de culture dans des sols argileux pauvres en carbone organique favorise la formation de macroagrégats stables à l'eau, améliorant ainsi la structure du sol et la rétention du carbone organique. En outre, leurs recherches ont mis en évidence que les traits racinaires des plantes influencent la macroagrégation du sol, soulignant l'importance de la sélection des espèces végétales pour améliorer la qualité physique du sol (Poirier et al., 2018). Pareillement, une autre étude a mis en lumière que des traits racinaires comme la longueur (en cm), la surface racinaire (en cm²) et la biomasse racinaire (en g), sont positivement corrélées au contenu en carbone organique du sol et à la stabilité des agrégats (Haynes et Beare, 1997).

4.7 Conclusion

Cette, étude met en évidence le rôle déterminant des légumineuses intercalaires, notamment le trèfle blanc et le trèfle incarnat dans l'amélioration de la fertilité et de la structure des sols au Québec. La modalité de semis a influencé significativement les réponses observées, avec un semis précoce favorisant une biomasse racinaire plus dense, une composition chimique des racines plus favorable (plus d'azote, composés solubles, rapport C/N plus faible) et une meilleure contribution aux stocks de carbone et d'azote racinaires. Le trèfle blanc, même avec peu de biomasse aérienne, a montré une capacité à enrichir le sol via ses racines, alors que le trèfle incarnat s'est distingué par son effet positif sur la stabilité structurale des sols, notamment à travers la

formation de macroagrégats. Cette dualité entre amélioration chimique via le trèfle blanc et amélioration physique via le trèfle incarnat montre l'intérêt de combiner ces deux légumineuses dans les systèmes de grandes cultures pour optimiser la santé globale du sol. De ce fait, il est très pertinent de faire un choix judicieux d'espèces, de mode d'implantation et d'une gestion adéquate de la compétition avec les adventices pour optimiser les bénéfices agroécologiques des légumineuses. Il est donc recommandé de privilégier l'implantation au semis pour assurer un bon développement racinaire et maximiser la fixation symbiotique de l'azote, tout en maintenant une couverture végétale favorable dans l'entre-rang.

Tableau 9 Pourcentage de biomasse (2019 et 2020) des légumineuses et adventices retrouvées dans l'entre-rang

Site	Phase	Espèce	Adventices 2019 (% biomasse)	Légumineuses 2019 (% biomasse)	Adventices 2020 (% biomasse)	Légumineuses 2020 (% biomasse)
Laverlochère	Semis	Trèfle blanc	11.3 (4.4)	88.7 (4.4)	54.3 (11.3)	45.7 (11.3)
Laverlochère	Semis	Trèfle rouge	12.3 (7.2)	87.7 (7.2)	63.3 (2.5)	36.7 (2.5)
Laverlochère	Semis	Trèfle incarnat	3.0 (2.0)	97.0 (2.0)	23.8 (6.8)	76.2 (6.8)
Laverlochère	Tallage	Trèfle blanc	1.6 (1.6)	98.4 (1.6)	37.9 (9.0)	62.1 (9.0)
Laverlochère	Tallage	Trèfle rouge	9.0 (3.1)	91.1 (3.1)	45.1 (4.8)	54.9 (4.8)
Laverlochère	Tallage	Trèfle incarnat	4.2 (2.5)	95.8 (2.5)	32.1 (5.8)	67.9 (5.8)
Poularies	Semis	Mélilot jaune	13.1 (5.3)	86.9 (5.3)	95.5 (0.8)	4.5 (0.8)
Poularies	Semis	Trèfle blanc	10.3 (1.5)	89.8 (1.5)	57.4 (8.6)	42.6 (8.6)
Poularies	Semis	Trèfle incarnat	5.4 (2.4)	94.6 (2.3)	55.9 (6.4)	44.1 (6.3)
Poularies	Tallage	Mélilot jaune	-	-	88.4 (5.9)	11.6 (5.9)
Poularies	Tallage	Trèfle blanc	-	-	73.4 (9.1)	26.6 (9.1)
Poularies	Tallage	Trèfle incarnat	-	-	58.3 (5.2)	41.7 (5.2)

Tableau 10 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2019

	Concentrations en carbone (C) (mg g ⁻¹)	Concentrations en azote (N) (mg g ⁻¹)	Rapport C/N -	Soluble (mg g ⁻¹)	Concentrations en fibres			Densité de masse (mg cm ⁻³)	Stock de C racinaire (kg ha ⁻¹)	Stock de N racinaire (kg ha ⁻¹)
					Hémicellulose (mg g ⁻¹)	Cellulose (mg g ⁻¹)	Lignine (mg g ⁻¹)			
Laverlochère										
Semis										
Trèfle blanc	407 (17)	16.4 (2.0)	28.8 (2.8)	426 (17)	239 (09)	227 (20)	108 (25)	0.78 (0.23)	194 (61)	7.3 (1.8)
Trèfle rouge	410 (05)	18.1 (1.4)	23.0 (1.5)	384 (42)	242 (12)	262 (29)	112 (16)	0.50 (0.21)	125 (53)	4.4 (1.1)
Trèfle incarnat	418 (05)	13.3 (3.1)	35.4 (6.0)	334 (110)	261 (44)	322 (48)	82 (18)	0.56 (0.10)	142 (27)	6.0 (3.0)
Témoin	421 (23)	16.8 (3.1)	26.7 (5.1)	327 (53)	251 (19)	321 (37)	102 (07)	0.23 (0.08)	68 (4)	3.0 (1.6)
Tallage										
Trèfle blanc	408 (20)	13.3 (0.6)	30.9 (2.8)	333 (49)	257 (26)	316 (38)	94 (08)	0.33 (0.13)	133 (01)	4.4 (0.4)
Trèfle rouge	401 (05)	16.1 (2.9)	28.7 (7.3)	363 (93)	246 (31)	269 (53)	110 (08)	0.19 (0.11)	46 (27)	1.3 (0.4)
Trèfle incarnat	356 (18)	16.4 (0.1)	21.7 (1.3)	400 (43)	258 (47)	197 (34)	157 (25)	0.15 (0.04)	35 (10)	1.7 (0.5)
Témoin	404 (11)	14.8 (0.9)	27.6 (1.4)	352 (16)	290 (23)	217 (09)	141 (14)	0.17 (0.01)	42 (02)	1.5 (0.1)
P Leg	<0.01	0.40	0.74	0.42	0.42	0.50	0.03	0.41	0.04	0.01
P Imp	0.03	0.49	0.51	0.93	0.88	0.97	0.04	<0.01	0.06	<0.01
P Leg x Imp	0.05	0.28	0.09	0.12	0.63	<0.01	0.02	0.25	0.62	0.26
Poularies										
Semis										
Mélilot jaune	405 (16)	15.5 (1.8)	27.1 (2.8)	291 (10)	308 (12)	285 (09)	116 (09)	0.87 (0.29)	209 (65)	7.3 (2.1)
Trèfle blanc	389 (08)	14.4 (0.4)	27.2 (1.2)	441 (91)	251 (21)	268 (30)	108 (10)	0.54 (0.13)	125 (29)	4.6 (1.0)
Trèfle incarnat	430 (12)	12.3 (0.4)	35.0 (1.4)	287 (19)	310 (16)	305 (09)	97 (06)	0.48 (0.21)	123 (55)	3.6 (1.7)
Témoin	415 (30)	11.6 (1.8)	41.3 (11.4)	291 (54)	289 (21)	324 (65)	95 (19)	0.63 (0.36)	138 (67)	5.2 (3.2)
Tallage										
Mélilot jaune	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle blanc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle incarnat	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Témoin	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P Leg	0.25	0.02	<0.001	0.02	0.05	0.94	0.14	0.30	0.62	0.60
P Imp	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P Leg x Imp	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P* Leg), du mode d'implantation (*P* Imp) et de leurs interactions (*P* Leg x Imp) sont présentées sous les moyennes pour chaque site. nd = données non disponibles.

Tableau 11 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2020

	Concentration en carbone (C)	Concentration en azote (N)	Rapport C/N	Concentrations en fibres				Densité de masse	Stock de C racinaire	Stock de N racinaire
	(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	-	Soluble (mg g ⁻¹)	Hémicellulose (mg g ⁻¹)	Cellulose (mg g ⁻¹)	Lignine (mg g ⁻¹)	(mg cm ⁻³)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
Laverlochère										
Semis										
Trèfle blanc	432 (07)	11.2 (1.3)	39.1 (5.3)	245 (02)	296 (24)	232 (28)	136 (03)	0.17 (0.00)	107 (02)	2.8 (0.3)
Trèfle rouge	425 (06)	14.4 (1.6)	30.5 (2.9)	304 (49)	269 (14)	311 (32)	116 (20)	0.12 (0.02)	74 (11)	2.4 (0.4)
Trèfle incarnat	406 (18)	12.5 (1.9)	35.8 (7.6)	295 (38)	291 (09)	299 (34)	115 (15)	0.44 (0.14)	256 (71)	9.0 (4.1)
Témoin	421 (09)	14.4 (2.8)	32.8 (6.7)	306 (60)	279 (14)	319 (36)	96 (11)	0.25 (0.10)	164 (66)	6.1 (3.5)
Tallage										
Trèfle blanc	391 (38)	12.2 (1.8)	33.6 (5.1)	294 (33)	261 (10)	331 (15)	115 (13)	0.29 (0.02)	172 (25)	5.5 (1.2)
Trèfle rouge	416 (09)	13.8 (2.3)	33.0 (5.9)	315 (35)	268 (17)	311 (11)	106 (10)	0.21 (0.04)	131 (27)	3.9 (0.6)
Trèfle incarnat	425 (05)	16.8 (2.6)	27.6 (5.0)	272 (22)	266 (18)	341 (22)	122 (06)	0.27 (0.11)	171 (69)	5.6 (1.3)
Témoin	428 (12)	11.9 (3.1)	38.9 (10.4)	236 (30)	311 (07)	342 (34)	111 (09)	0.17 (0.06)	160 (54)	4.0 (0.3)
<i>P</i> _{Leg}	0.74	0.86	0.71	0.54	0.13	0.39	0.43	0.55	0.31	0.22
<i>P</i> _{Imp}	0.89	0.66	0.51	0.59	0.21	0.91	0.51	0.99	0.63	0.41
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.82	0.60	0.47	0.32	0.11	0.86	0.63	0.40	0.84	0.84
Poularies										
Semis										
Mélilot jaune	406 (09)	15.2 (1.3)	27.2 (2.1)	328 (23)	301 (21)	284 (06)	88 (12)	0.39 (0.06)	238 (34)	8.6 (0.7)
Trèfle blanc	407 (14)	15.5 (0.7)	26.3 (1.0)	375 (28)	268 (12)	256 (25)	101 (08)	1.66 (0.19)	1013 (123)	39.1 (6.1)
Trèfle incarnat	389 (16)	14.3 (0.6)	27.4 (2.0)	359 (25)	263 (15)	267 (24)	111 (10)	1.29 (0.17)	759 (122)	27.2 (2.4)
Témoin	402 (16)	14.5 (0.4)	27.8 (1.2)	316 (24)	305 (14)	278 (22)	102 (11)	1.14 (0.40)	694 (256)	24.2 (7.7)
Tallage										
Mélilot jaune	396 (20)	12.6 (1.6)	33.6 (5.5)	413 (94)	247 (43)	275 (49)	115 (35)	0.44 (0.11)	263 (77)	7.7 (0.9)
Trèfle blanc	426 (08)	10.4 (1.5)	44.2 (7.3)	232 (54)	292 (15)	313 (28)	71 (19)	0.93 (0.24)	599 (159)	13.1 (1.3)
Trèfle incarnat	396 (12)	14.8 (1.0)	27.3 (2.5)	366 (27)	261 (05)	267 (13)	105 (20)	1.10 (0.16)	636 (114)	23.0 (3.1)
Témoin	416 (05)	13.9 (0.6)	30.2 (1.2)	332 (23)	310 (09)	278 (06)	80 (12)	0.77 (0.13)	481 (84)	16.2 (3.2)
<i>P</i> _{Leg}	0.67	0.11	0.09	0.36	0.05	0.40	0.08	<0.01	0.04	<0.001
<i>P</i> _{Imp}	0.42	0.84	0.64	0.42	<0.01	0.85	0.06	0.08	0.01	<0.01
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.97	0.21	0.11	0.08	0.03	0.37	0.12	0.43	0.20	0.05

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P* Leg), du mode d'implantation (*P* Imp) et de leurs interactions (*P* Leg x Imp) sont présentées sous les moyennes pour chaque site. nd = données non disponibles.

Tableau 12 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les propriétés des sols à 0-6 cm de profondeur en 2019

	Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	Porosité totale (cm ³ cm ⁻³)	Concentrations en carbone (C) (g kg ⁻¹)	Concentrations en azote (N) (g kg ⁻¹)	Rapport C/N -	Matière organique (%)	Stocks de carbone (C) (Mg C ha ⁻¹)	Stocks d'azote (N) (Mg N ha ⁻¹)
Laverlochère								
Semis								
Trèfle blanc	0.69 (0.04)	0.74 (0.01)	76.5 (1.5)	4.62 (0.03)	16.6 (0.2)	13.2 (0.3)	31.8 (2.1)	1.92 (0.12)
Trèfle incarnat	0.72 (0.05)	0.73 (0.02)	64.8 (2.3)	4.03 (0.15)	16.1 (0.2)	11.2 (0.4)	28.1 (2.6)	1.75 (0.16)
Témoin	0.81 (0.09)	0.69 (0.03)	67.6 (4.6)	4.27 (0.22)	15.8 (0.3)	11.6 (0.8)	32.4 (2.1)	2.05 (0.16)
Tallage								
Trèfle blanc	0.72 (0.08)	0.73 (0.03)	69.6 (3.2)	4.34 (0.16)	16.0 (0.2)	12.0 (0.6)	30.6 (4.4)	1.90 (0.26)
Trèfle rouge	0.76 (0.04)	0.71 (0.01)	72.9 (1.7)	4.45 (0.06)	16.4 (0.2)	12.6 (0.3)	33.2 (1.9)	2.03 (0.12)
Trèfle incarnat	0.84 (0.02)	0.68 (0.01)	55.0 (5.7)	3.60 (0.29)	15.2 (0.4)	9.5 (1.0)	27.7 (2.5)	1.82 (0.12)
Témoin	0.71 (0.06)	0.73 (0.02)	72.7 (2.4)	4.48 (0.08)	16.2 (0.3)	12.5 (0.4)	31.0 (3.1)	1.90 (0.16)
<i>P</i> _{Leg}	0.98	0.98	0.26	0.69	1.00	0.26	0.66	0.74
<i>P</i> _{Imp}	0.83	0.83	<0.01	<0.01	0.55	<0.01	0.79	0.81
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.70	0.70	0.04	0.08	0.24	0.04	0.99	0.98
Poularies								
Semis								
Mélilot jaune	0.70 (0.07)	0.74 (0.03)	49.6 (3.9)	4.85 (0.29)	10.2 (0.3)	8.6 (0.7)	20.7 (2.4)	2.03 (0.22)
Trèfle blanc	0.74 (0.05)	0.72 (0.02)	50.5 (10.4)	4.97 (0.67)	9.9 (0.8)	8.7 (1.8)	18.2 (1.4)	1.98 (0.15)
Trèfle incarnat	0.80 (0.04)	0.70 (0.01)	38.7 (4.3)	4.19 (0.41)	9.2 (0.4)	6.7 (0.8)	21.4 (3.0)	2.13 (0.15)
Témoin	0.77 (0.02)	0.71 (0.01)	40.1 (3.1)	4.06 (0.17)	9.8 (0.4)	6.9 (0.5)	18.6 (1.5)	1.88 (0.08)
Tallage								
Mélilot jaune	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle blanc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle incarnat	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Témoin	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<i>P</i> _{Leg}	0.55	0.55	0.10	0.10	0.07	0.10	0.58	0.34
<i>P</i> _{Imp}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<i>P</i> _{Leg x Imp}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P* Leg), du mode d'implantation (*P* Imp) et de leurs interactions (*P* Leg x Imp) sont présentées sous les moyennes pour chaque site. nd = données non disponible

Tableau 13 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les propriétés des sols à 0-15 cm de profondeur en 2020

	Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	Porosité totale (cm ³ cm ⁻³)	Concentration en carbone (C) (g kg ⁻¹)	Concentration en azote (N) (mg g ⁻¹)	Rapport C/N -	Matière organique (%)	Stocks de carbone (C) (Mg C ha ⁻¹)	Stocks d'azote (N) (Mg N ha ⁻¹)
Laverlochère								
Semis								
Trèfle blanc	1.18 (0.04)	0.56 (0.02)	70.6 (6.8)	4.56 (0.17)	15.5 (0.9)	12.2 (1.2)	124.4 (7.6)	8.0 (0.01)
Trèfle rouge	1.33 (0.05)	0.50 (0.02)	61.6 (4.7)	4.15 (0.19)	14.8 (0.5)	10.6 (0.8)	122.7 (9.0)	7.3 (0.3)
Trèfle incarnat	1.28 (0.09)	0.52 (0.03)	57.3 (6.2)	3.86 (0.29)	14.7 (0.6)	9.9 (1.1)	107.9 (8.6)	8.3 (0.4)
Témoin	1.17 (0.11)	0.56 (0.04)	71.1 (9.2)	4.56 (0.41)	15.4 (0.7)	12.3 (1.6)	120.7 (6.9)	7.8 (0.2)
Tallage								
Trèfle blanc	1.33 (0.04)	0.50 (0.01)	54.7 (3.0)	3.77 (0.15)	14.5 (0.4)	9.4 (0.5)	108.7 (4.0)	7.5 (0.1)
Trèfle rouge	1.28 (0.06)	0.52 (0.01)	71.6 (5.6)	4.63 (0.20)	15.4 (0.6)	12.4 (1.0)	137.4 (10.1)	8.9 (0.4)
Trèfle incarnat	1.28 (0.08)	0.52 (0.03)	61.5 (5.4)	4.19 (0.28)	14.6 (0.4)	10.6 (0.9)	116.6 (5.9)	8.0 (0.3)
Témoin	1.28 (0.03)	0.56 (0.02)	70.0 (5.9)	4.59 (0.22)	15.2 (0.6)	12.1 (1.0)	121.5 (6.6)	8.0 (0.3)
<i>P</i> _{Leg}	0.14	0.14	0.86	0.04	0.55	0.86	0.39	0.83
<i>P</i> _{Imp}	0.59	0.59	0.30	0.64	0.57	0.30	0.74	0.15
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.67	0.67	0.08	0.01	0.50	0.08	0.43	0.10
Poularies								
Semis								
Mélicot jaune	1.22 (0.05)	0.54 (0.02)	49.2 (5.3)	4.07 (0.41)	12.1 (0.2)	8.5 (0.9)	89.9 (9.7)	7.4 (0.7)
Trèfle blanc	1.34 (0.07)	0.50 (0.03)	45.3 (7.1)	3.60 (0.47)	12.3 (0.4)	7.8 (1.2)	88.8 (10.7)	7.2 (0.7)
Trèfle incarnat	1.26 (0.04)	0.52 (0.02)	43.8 (9.3)	3.70 (0.78)	11.8 (0.3)	7.6 (1.6)	81.5 (14.2)	6.9 (1.2)
Témoin	1.19 (0.07)	0.55 (0.03)	48.1 (5.6)	3.91 (0.41)	12.3 (0.1)	8.3 (1.0)	86.2 (11.3)	7.0 (0.8)
Tallage								
Mélicot jaune	1.44 (0.03)	0.46 (0.01)	31.4 (2.0)	2.47 (0.23)	12.8 (0.5)	5.4 (0.3)	67.6 (4.0)	5.3 (0.5)
Trèfle blanc	1.14 (0.04)	0.57 (0.01)	54.9 (6.1)	4.43 (0.43)	12.4 (0.2)	9.5 (1.0)	93.7 (11.4)	7.6 (0.8)
Trèfle incarnat	1.36 (0.06)	0.49 (0.02)	39.7 (3.0)	3.24 (0.24)	12.3 (0.1)	6.8 (0.5)	80.5 (5.3)	6.6 (0.4)
Témoin	1.17 (0.07)	0.56 (0.03)	44.4 (6.0)	3.53 (0.44)	12.5 (0.2)	7.7 (1.0)	76.7 (8.7)	6.1 (0.6)
<i>P</i> _{Leg}	0.72	0.72	0.86	0.93	<0.01	0.86	0.31	0.63
<i>P</i> _{Imp}	0.24	0.24	0.56	0.54	0.10	0.56	0.79	0.34
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.06	0.06	0.04	0.02	0.17	0.04	0.16	0.16

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P*_{Leg}), du mode d'implantation (*P*_{Imp}) et de leurs interactions (*P*_{Leg x Imp}) sont présentées sous les moyennes pour chaque site. nd = données non disponibles.

Tableau 14 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la stabilité de la structure du sol à 0-6 cm de profondeur en 2019

	Macroagrégats de 8 à 4 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 4 à 2 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 2 à 1 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 1 à 0.5 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 0.5 à 0.25 mm (g kg ⁻¹)	Somme des macroagrégats (g kg ⁻¹)	Diamètre moyen pondéré (mm)
Laverlochère							
Semis							
Trèfle blanc	83.0 (15.8)	122.9 (21.8)	168.6 (17.1)	168.4 (28.4)	106.0 (22.3)	648.9 (14.5)	1.33 (0.14)
Trèfle rouge	95.8 (40.1)	133.5 (50.9)	180.9 (24.9)	110.4 (19.9)	64.2 (26.9)	584.8 (78.4)	1.41 (0.39)
Trèfle incarnat	107.9 (30.1)	165.6 (41.8)	240.0 (53.6)	194.6 (31.8)	96.7 (44.1)	804.8 (68.7)	1.71 (0.26)
Témoin	83.6 (32.7)	140.3 (40.7)	208.5 (44.7)	148.4 (32.0)	74.4 (20.0)	658.2 (49.0)	1.42 (0.25)
Tallage							
Trèfle blanc	109.6 (47.3)	143.7 (37.4)	160.4 (14.0)	188.8 (36.1)	96.0 (26.0)	695.8 (38.2)	1.53 (0.37)
Trèfle rouge	59.8 (8.3)	157.9 (39.5)	173.2 (27.0)	148.2 (29.0)	81.9 (26.6)	621.0 (61.4)	1.28 (0.18)
Trèfle incarnat	152.2 (20.7)	119.7 (20.9)	168.2 (31.5)	166.3 (28.6)	79.4 (19.1)	685.9 (31.5)	1.72 (0.16)
Témoin	103.6 (39.4)	194.7 (62.9)	180.2 (35.2)	142.1 (41.3)	64.3 (37.8)	684.9 (47.0)	1.65 (0.39)
<i>P</i> _{Leg}	0.95	0.76	0.12	0.71	0.72	0.04	0.77
<i>P</i> _{Imp}	0.72	0.92	0.18	0.96	0.76	0.23	0.62
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.53	0.19	0.02	0.81	0.97	<0.01	0.90
Poularies							
Semis							
Mélicot jaune	102.1 (20.1)	132.5 (15.8)	158.6 (11.9)	166.1 (47.4)	38.4 (7.1)	616.8 (60.0)	1.54 (0.16)
Trèfle blanc	154.3 (9.3)	193.3 (12.2)	148.3 (17.6)	82.2 (13.0)	27.2 (1.9)	605.3 (3.2)	1.85 (0.03)
Trèfle incarnat	154.2 (28.4)	171.1 (27.8)	186.1 (33.0)	87.8 (12.9)	31.6 (4.8)	630.9 (17.9)	1.84 (0.17)
Témoin	143.7 (17.5)	175.2 (9.2)	154.6 (17.3)	97.8 (4.2)	58.7 (4.2)	630.0 (27.4)	1.76 (0.11)
Tallage							
Mélicot jaune	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle blanc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Trèfle incarnat	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Témoin	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<i>P</i> _{Leg}	0.81	0.05	0.39	0.55	0.001	0.98	0.38
<i>P</i> _{Imp}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<i>P</i> _{Leg x Imp}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P*_{Leg}), du mode d'implantation (*P*_{Imp}) et de leurs interactions (*P*_{Leg x Imp}) sont présentées sous les moyennes des variables pour chaque site. nd = données non disponibles.

Table 15 Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la stabilité de la structure du sol à 0-15 cm de profondeur en 2020

	Macroagrégats de 8 à 4 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 4 à 2 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 2 à 1 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 1 à 0.5 mm (g kg ⁻¹)	Macroagrégats de 0.5 à 0.25 mm (g kg ⁻¹)	Somme des macroagrégats (g kg ⁻¹)	Diamètre moyen pondéré (mm)
Laverlochère							
Semis							
Trèfle blanc	60.1 (42.2)	195.7 (36.1)	255.2 (68.2)	90.7 (29.0)	88.0 (55.2)	689.7 (22.0)	1.47 (0.08)
Trèfle rouge	47.3 (10.4)	131.5 (38.1)	228.3 (35.7)	209.3 (57.6)	135.8 (62.0)	752.2 (76.9)	1.26 (0.20)
Trèfle incarnat	50.2 (21.0)	150.7 (57.4)	260.1 (79.1)	155.4 (40.9)	111.4 (57.9)	727.9 (75.5)	1.34 (0.36)
Témoin	23.8 (3.1)	180.8 (46.7)	274.0 (27.4)	168.8 (22.6)	44.7 (3.9)	692.2 (40.2)	1.28 (0.12)
Tallage							
Trèfle blanc	47.0 (10.0)	109.2 (19.5)	240.7 (18.1)	239.2 (45.1)	78.9 (28.9)	715.0 (51.7)	1.22 (0.04)
Trèfle rouge	40.1 (20.6)	140.0 (32.3)	221.1 (32.5)	208.9 (33.7)	74.9 (12.1)	673.7 (96.4)	1.21 (0.24)
Trèfle incarnat	71.7 (20.0)	118.2 (33.7)	218.6 (13.9)	166.6 (58.6)	63.6 (10.8)	650.1 (86.1)	1.31 (0.20)
Témoin	34.8 (11.6)	133.6 (28.6)	300.0 (22.8)	149.7 (2.7)	43.6 (4.9)	661.8 (57.6)	1.23 (0.17)
<i>P</i> _{Leg}	0.50	0.95	0.39	0.65	0.86	0.70	0.01
<i>P</i> _{Imp}	0.61	0.36	0.98	0.05	0.66	0.55	0.74
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.52	0.82	0.75	0.27	0.74	0.86	0.01
Poularies							
Semis							
Mélicot jaune	67.0 (5.4)	158.4 (28.7)	289.2 (34.8)	170.9 (31.7)	51.5 (7.1)	737.0 (5.7)	1.49 (0.05)
Trèfle blanc	131.2 (11.2)	197.4 (22.9)	228.0 (28.6)	141.8 (19.3)	42.5 (6.7)	740.8 (9.2)	1.88 (0.05)
Trèfle incarnat	123.6 (49.4)	176.9 (26.7)	251.2 (32.0)	150.6 (26.8)	50.0 (6.8)	752.4 (11.2)	1.81 (0.28)
Témoin	246.6 (129.3)	140.8 (35.8)	205.4 (51.4)	136.6 (28.2)	40.5 (7.0)	769.8 (18.3)	2.36 (0.59)
Tallage							
Mélicot jaune	106.1 (22.3)	291.6 (85.0)	186.6 (24.2)	137.9 (30.8)	47.4 (9.5)	769.6 (27.4)	1.94 (0.16)
Trèfle blanc	141.3 (40.6)	264.8 (30.1)	223.0 (45.8)	89.0 (5.8)	36.4 (4.0)	754.6 (6.2)	2.09 (0.20)
Trèfle incarnat	129.6 (56.6)	232.7 (46.5)	243.6 (14.5)	120.3 (32.6)	47.1 (11.1)	773.3 (16.6)	1.98 (0.28)
Témoin	86.5 (18.8)	135.2 (27.8)	259.5 (11.9)	182.1 (23.1)	32.1 (13.2)	698.5 (16.8)	1.52 (0.13)
<i>P</i> _{Leg}	0.14	0.57	0.73	0.64	0.26	0.05	0.34
<i>P</i> _{Imp}	0.54	0.25	0.80	0.33	0.20	0.66	0.33
<i>P</i> _{Leg x Imp}	0.11	0.82	0.13	0.42	0.98	<0.01	0.18

Note : Les probabilités des effets des légumineuses (*P* Leg), du mode d'implantation (*P* Imp) et de leurs interactions (*P* Leg x Imp) sont présentées sous les moyennes des variables pour chaque site. nd = données non disponibles.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, l'agriculture biologique s'impose comme une approche visant à concilier productivité, préservation des ressources naturelles et maintien de la qualité des sols. En production céréalière biologique, les pratiques culturales demeurent en constante évolutions et demande beaucoup plus d'innovation. Dans un contexte où l'utilisation des produits phytosanitaires est prohibée, nous avons proposé l'approche des cultures de couvertures notamment par des légumineuses intercalaires comme une alternative pour lutter contre les adventices et améliorer les propriétés physico-chimiques du sol.

Nos résultats ont permis de démontrer que le choix de l'espèce de légumineuse influence fortement la richesse, l'abondance et les stratégies fonctionnelles des adventices. En particulier, le trèfle incarnat s'est distingué par sa capacité à réduire la couverture adventice par un effet de compétition marquée, tandis que le mélilot jaune et le trèfle blanc ont favorisé des communautés plus diversifiées, orientées vers des stratégies de conservation des ressources. Ces résultats mettent en évidence le rôle central du choix des espèces de légumineuses et des mécanismes de compétition dans la structuration des communautés adventices en systèmes céréaliers biologiques (Chapitre 1).

Dans un second plan, cette étude a révélé que l'implantation de légumineuses intercalaires dans des cultures céréalières biologiques n'a pas d'influence sur les rendements. Le trèfle incarnat s'est révélé être plus performant en termes de quantité de biomasse aérienne produite et a pu limiter de manière considérable la croissance des adventices, alors que les trèfles rouge et blanc présentaient une biomasse enrichie en azote, avec des rapports C/N faibles et favorables à une décomposition rapide, mais relativement moins abondante. L'impact du mélilot jaune s'est avéré marginal. Le mode d'implantation au semis a pu mettre en évidence, dans une moindre mesure, un impact positif sur les concentrations et les quantités de C et N apportées par certaines légumineuses intercalaires (Chapitre 2).

Le troisième chapitre a mis en évidence le rôle complémentaire du trèfle blanc et du trèfle incarnat dans l'amélioration de la santé des sols. Le semis précoce a favorisé le développement racinaire et la contribution aux stocks de carbone et d'azote, tandis que le trèfle blanc a principalement contribué à l'enrichissement chimique du sol, et le trèfle incarnat à l'amélioration de la stabilité structurale, notamment par la formation de macroagréats. Cette complémentarité fonctionnelle souligne l'intérêt de stratégies d'association et d'implantation adaptées pour maximiser les bénéfices agroécologiques des légumineuses intercalaires.

Au-delà de la simple composition floristique, l'approche fonctionnelle, principalement basée sur des traits foliaires s'est révélée être un outil pertinent pour mieux comprendre les mécanismes écologiques. Cette double approche a ainsi permis d'aller au-delà des réponses spécifiques aux espèces et d'interpréter les effets des légumineuses intercalaires en termes de fonctionnement des agroécosystèmes. Cependant, cette approche menée dans ce travail s'est volontairement limitée à un nombre restreint de traits, principalement centrés sur les feuilles, ce qui constitue une limite à la portée des interprétations. Dans cette optique, des perspectives de recherche émergent, notamment l'intégration de traits fonctionnels complémentaires, tels que les traits racinaires (architecture, longueur, profondeur ou densité racinaire) ou encore les traits liés aux graines, qui pourraient fournir une compréhension plus fine des stratégies adaptatives des espèces et des interactions plante-sol. L'élargissement de l'éventail des traits étudiés permettrait ainsi de renforcer l'analyse fonctionnelle et d'approfondir l'évaluation des effets des cultures de couverture dans les systèmes céréaliers biologiques.

APPENDICE A –

Table 16 Mean ($\pm$ standard deviation) of leaf trait values for the most abundant weed species in each intercropped legume treatment (Mo = *Melilotus officinalis*, Ti = *Trifolium incarnatum*, Tr = *Trifolium repens*, Control = control) in 2019

Weeds	Mo	Ti	Tr	Control
Height (cm)				
<i>Achillea millefolium</i>	-	32.7 (14.0)	12.3 (5)	-
<i>Daucus carota</i>	7.0 (2.2)	-	-	-
<i>Sonchus asper</i>	-	-	41.0 (7.0)	29.3 (6.0)
<i>Plantago major</i>	-	11.7 (1.5)	11.0 (1.5)	13.0 (2.6)
<i>Taraxacum officinale</i>	12.0 (1.7)	21.0 (11.5)	-	10.7 (4.2)
<i>Urtica urens</i>	30.3 (1.5)	41.7 (13.8)	32.0 (17.7)	12.7 (6.4)
<i>Vicia sativa</i>	31.3 (1.2)	16.3 (9.6)	17.7 (4.9)	84.3 (6.4)
Specific Leaf Area (SLA, m² kg⁻¹)				
<i>Achillea millefolium</i>	-	25.9 (6.5)	19.4 (13.9)	-
<i>Daucus carota</i>	28.8 (5.4)	-	-	-
<i>Sonchus asper</i>	-	-	44.9 (31.4)	38.0 (20.0)
<i>Plantago major</i>	-	134 (115)	231.9 (55.7)	49.6 (40.6)
<i>Taraxacum officinale</i>	33.7 (4.5)	38.1 (25.2)	-	20.1 (6.9)
<i>Urtica urens</i>	25.1 (2.0)	218 (2)	17.8 (1.2)	28.5 (3.5)
<i>Vicia sativa</i>	17.8 (8.2)	299 (80)	24.2 (9.3)	13.8 (14.7)
Leaf Dry Matter Content (LDMC, mg g⁻¹)				
<i>Achillea millefolium</i>	-	472 (9)	315 (111)	-
<i>Daucus carota</i>	182 (111)	-	-	-
<i>Sonchus asper</i>	-	-	24 (5)	63.1 (34)
<i>Plantago major</i>	-	129 (114)	123 (103)	45.0 (35.0)
<i>Taraxacum officinale</i>	38.0 (16.0)	89 (63)	-	42.6 (4.5)
<i>Urtica urens</i>	232 (33)	179 (148)	233 (33)	240 (6)
<i>Vicia sativa</i>	152 (4)	15.7 (2.1)	163 (36)	76.6 (35.6)
Leaf area (LA, cm²)				
<i>Achillea millefolium</i>	-	1.8 (0.1)	0.7 (0.4)	-
<i>Daucus carota</i>	16.6 (5.4)	-	-	-
<i>Sonchus asper</i>	-	-	14.6 (2.5)	13.0 (4)
<i>Plantago major</i>	-	4.7 (0.4)	20.4 (8.4)	17.8 (5.1)
<i>Taraxacum officinale</i>	2.5 (0.9)	1.9 (1.03)	-	1.7 (0.8)
<i>Urtica urens</i>	6.9 (7.5)	1.3 (0.4)	1.1 (0.1)	1.4 (0.4)
<i>Vicia sativa</i>	2.5 (0.4)	3.1 (0.5)	3.1 (0.9)	0.9 (0.5)
Canopy area (cm²)				
<i>Achillea millefolium</i>	-	141 (106)	176 (98)	-
<i>Daucus carota</i>	464 (230)	-	-	-

<i>Sonchus asper</i>	-	-	71 (40)	68 (35)
<i>Plantago major</i>	-	93 (29)	192 (110)	123 (90)
<i>Taraxacum officinale</i>	211 (196)	501 (332)	-	186 (94)
<i>Urtica urens</i>	187 (134)	302 (238)	95 (88)	90 (30)
<i>Vicia sativa</i>	146 (40)	89 (35)	103 (52)	130 (103)

Table 17 Mean ($\pm$ standard deviation) of leaf trait values for the most abundant weed species in each intercrop legume treatment (MO = *Melilotus officinalis*, TI = *Trifolium incarnatum*, TR = *Trifolium repens*, Control = without legumes) in 2020.

Weeds	Mo	Ti	Tr	Control
Height (cm)				
<i>Elymus repens</i>	26.7 (1.7)	2.4 (1.1)	33.0 (5.0)	42.2 (0.8)
<i>Equisetum arvense</i>	-	2.4 (1.3)	30.2 (3.4)	-
<i>Plantago major</i>	30.6 (1.4)	23.4 (5.8)	31.0 (7.8)	25.7 (2.1)
<i>Sonchus arvensis</i>	30.4 (1.4)	26.2 (0.9)	-	36.6 (3.5)
<i>Sonchus asper</i>	77.2 (3.5)	-	17.9 (3.7)	-
<i>Urtica urens</i>	22.3 (5.5)	3.1 (0.6)	32.6 (7.6)	22.6 (0.3)
<i>Vicia sativa</i>	-	3.8 (1.1)	23.9 (1.7)	14.7 (0.5)
Specific Leaf Area (SLA, m² kg⁻¹)				
<i>Elymus repens</i>	235 (83)	335 (35)	254 (56)	8.3 (3.6)
<i>Equisetum arvense</i>	-	38.9 (24.1)	76.8 (59.2)	-
<i>Plantago major</i>	6.5 (1.1)	222 (80)	260 (35)	2.78 (2.8)
<i>Sonchus arvensis</i>	38.5 (3.0)	220 (50)	-	2.7 (2.1)
<i>Sonchus asper</i>	33.7 (5.2)	-	15.4 (4.4)	-
<i>Urtica urens</i>	4.5 (2.9)	88.4 (52.8)	23.4 (13.5)	3.2 (0.3)
<i>Vicia sativa</i>	-	358 (110)	23.4 (8.4)	1.5 (0.5)
Leaf Dry Matter Content (LDMC, mg g⁻¹)				
<i>Elymus repens</i>	322 (21)	235 (109)	201 (26)	396 (1)
<i>Equisetum arvense</i>	-	16.2 (0.6)	152 (21)	-
<i>Plantago major</i>	18.3 (7.3)	10.3 (3.2)	11.8 (0.6)	301 (2)
<i>Sonchus arvensis</i>	38.8 (22.8)	11.5 (0.9)	-	77.2 (3.6)
<i>Sonchus asper</i>	98.6 (16.3)	-	116 (42.2)	-
<i>Urtica urens</i>	49.5 (22.2)	8.6 (3.3)	63.5 (47.8)	92.1 (0.3)
<i>Vicia sativa</i>	-	15.6 (2.2)	164 (37)	525 (1)
Leaf area (LA, cm²)				
<i>Elymus repens</i>	2.3 (0.3)	9.9 (9.7)	5.1 (0.5)	1.7 (0.9)
<i>Equisetum arvense</i>	-	2.4 (1.3)	0.7 (0.2)	-
<i>Plantago major</i>	1.9 (0.8)	158 (72)	28.4 (4.9)	8.5 (1.3)

<i>Sonchus arvensis</i>	16.8 (6.6)	37.6 (24)	-	7.4 (3.6)
<i>Sonchus asper</i>	22.2 (1.7)	-	20.3 (5.7)	-
<i>Urtica urens</i>	1.3 (0.5)	14.1 (2.1)	5.1 (0.5)	1.2 (0.3)
<i>Vicia sativa</i>	-	99.9 (25.3)	3.0 (0.7)	0.9 (0.5)
Canopy area (cm²)				
<i>Elymus repens</i>	6.3 (2.1)	55.9 (6.3)	42.1 (21.7)	113 (1)
<i>Equisetum arvense</i>	-	26.1 (18.2)	29.3 (5.5)	-
<i>Plantago major</i>	431 (375)	20.9 (6.7)	260 (130)	292 (2)
<i>Sonchus arvensis</i>	173 (67)	83.4 (2.1)	-	26.3 (3.5)
<i>Sonchus asper</i>	20.8 (1.9)	-	4.9 (1.2)	-
<i>Urtica urens</i>	2.2 (3.4)	20.1 (6.7)	15.9 (5.7)	23.0 (7.8)
<i>Vicia sativa</i>	-	37.9 (5.5)	16.3 (3.3)	3.9 (0.5)

Table 18 Mean (standard deviation) of leaf trait values for intercrop legume species in 2019 and 2020.

Legume species	Height (cm)	SLA ¹ (m ² kg ⁻¹)	LDMC ² (mg g ⁻¹)	LA ³ (cm ²)	Canopy area (cm ²)
2019					
<i>Melilotus officinalis</i> (Mo)	29.0 (2.1)	17.8 (1.2)	222 (62)	3.0 (0.8)	159 (138)
<i>Trifolium incarnatum</i> (Ti)	44.5 (6.7)	38.1 (25.2)	119 (62)	1.9 (1.0)	173 (114)
<i>Trifolium repens</i> (Tr)	19.8 (1.9)	26.3 (5.7)	198 (57)	1.7 (0.5)	323 (234)
2020					
<i>Melilotus officinalis</i> (Mo)	9.9 (2.7)	33.4 (2.8)	231 (28)	3.8 (0.9)	133 (62)
<i>Trifolium incarnatum</i> (Ti)	34.0 (2.0)	36.0 (13.6)	180 (14)	10.5 (3.0)	36.9 (9.1)
<i>Trifolium repens</i> (Tr)	16.8 (1.6)	45.0 (15.0)	96.2 (32.6)	6.7 (1.9)	40 (15)

¹ SLA = Specific Leaf Area; ² LDMC = Leaf Dry Matter Content; ³ LA = Leaf Area.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abdallahi, M. M., & N'Dayegamiye, A. (2000). Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 81–89. <https://doi.org/10.4141/S98-094>
- Abad, M. R. H., Hamid, H., Ghasemi, A., & Jafari, M. (2021). Digital mapping of soil aggregate stability and the effectiveness of soil erosion control practices in Behbahan region. *Journal of Range and Watershed Management*. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.301998.1499>
- Abad, J., Hermoso de Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021). Cover crops in viticulture: A systematic review (1): Implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. *OENO One*, 55(1), 1–18. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.1.3599>
- Agriculture and Agri Food Canada. (2022). Government of Canada supports market development and growth for Canadian malting barley. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/en/agriculture-agri-food/news/2022/02/government-of-canada-supports-market-development-and-growth-for-canadian-malting-barley.html>
- Agriculture and Agri Food Canada. (2024). Le gouvernement du Canada annonce un financement pour améliorer la durabilité et la compétitivité des céréales canadiennes. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/agriculture-agroalimentaire/nouvelles/2024/10/le-gouvernement-du-canada-annonce-un-financement-pour-ameliorer-la-durabilite-et-la-competitivite-des-cereales-canadiennes.html>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2025). Canada: perspectives des principales grandes cultures 2025 - Rapport du Groupe de l'analyse du marché, Division des cultures et de l'horticulture, Direction du développement et de

l'analyse du secteur, Direction générale des services à l'industrie et aux marchés;
Gouvernement du Canada: Ottawa, Canada. 15 p.

Aerts, R. (1999). Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade offs and plant soil feedbacks. *Journal of Experimental Botany*, 50, 29–37. <https://doi.org/10.1093/jexbot/50.330.29>.

Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1–3), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)

Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The science of sustainable agriculture* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429495465>

Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G. J., & Simpson, M. J. (2021). Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>

Anugroho, F., Kitou, M., Nagumo, F., Kinjo, K., & Jayasinghe, G. Y. (2010). Potential growth of hairy vetch as a winter legume cover crop in subtropical soil conditions. *Soil Science & Plant Nutrition*, 56(2), 254–262. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2010.00445.x>

Anderson, F., Clough, T., Andreucci, M., & Moot, D. (2026). Nitrogen release from white clover (*Trifolium repens* L.) residue and ensuing plant–soil utilisation by arable rotations. *Frontiers in Agronomy*, 7, Article 1708560. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1708560>

Ansari, M., Roomesha, F., & Sohail, H. (2025). Improving soil health through organic agriculture: Effects on physicochemical and biological properties. *Journal of Environmental Sciences and Sustainability*, 2(2), Article 14. <https://jessj.org/index.php/jessj/article/view/14>

- Armengot, L., Blanco-Moreno, J. M., Bàrberi, P., Bocci, G., Carlesi, S., Aendekerk, R., Berner, A., Celette, F., Grosse, M., Huiting, H., Kranzler, A., Luik, A., Mäder, P., Peigné, J., Stoll, E., Delfosse, P., Sukkel, W., Surböck, A., Westaway, S., & Sans, F. X. (2016). Tillage as a driver of change in weed communities: A functional perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 222, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.021>
- Asha, D., Diksha, Shabnam, Sanwal, P., Dagar, S., & Dagar, H. (2023). Impact of organic farming practices on soil organic matter: A review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 1599–1603. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193705>
- Audet, R., Côté, H., Bachand, D., & Mailhot, A. (2012). Atlas agroclimatique du Québec [Site web]. Agrométéo Québec, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). <https://agrometeo.solutions-mesonet.org/atlas/> (consulté le 18 novembre 2025)
- Banerjee, S., & van der Heijden, M. G. A. (2023). Soil microbiomes and one health. *Nature Reviews Microbiology*, 21(1), 6–20. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>
- Bitarafan, Z., & Andreasen, C. (2020). Seed retention of ten common weed species at oat harvest reveals the potential for harvest weed seed control. *Weed Research*, 60, 343–352. <https://doi.org/10.1111/wre.12438>
- Bélanger, J., & Pilling, D. (Eds.). (2019). The state of the world's biodiversity for food and agriculture. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca3129en>
- Ben Mariem, S., Soba, D., Zhou, B., Loladze, I., Morales, F., & Aranjuelo, I. (2021). Climate change, crop yields, and grain quality of C₃ cereals: A meta-analysis of [CO₂], temperature, and drought effects. *Plants*, 10(6), 1052. <https://doi.org/10.3390/plants10061052>

- Berg, G., Grube, M., Schlöter, M., & Smalla, K. (2014). Unraveling the plant microbiome: Looking back and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 5, 148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00148>
- Benoit, P. (2010). Enherbement des sols : quels effets possibles sur le devenir environnemental des pesticides. Actes des Journées de l'AFPF. Les usages émergents des surfaces prairiales et des espèces fourragères, Mars 2010, Paris, France, pp. 19–28.
- Bilalis, D., Papastylianou, P., Konstantas, A., Patsiali, S., Karkanis, A., & Efthimiadou, A. (2010). Weed-suppressive effects of maize-legume intercropping in organic farming. *International Journal of Pest Management*, 56, 173–181. <https://doi.org/10.1080/09670870903304471>
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2007). Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. *Geoderma*, 141(3–4), 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.012>
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), 2449–2474. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 363–375). American Society of Agronomy.
- Bedoussac, L., L., Journet, E.-P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E. S., Prieur, L., & Justes, E. (2015). Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal–grain legume intercrops. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 911–935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>

- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Pers, G., Hedde, M., et al. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. Dans Labreuche, J., Laurent, F., Roger-Estrade, J. (Eds.), *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Chapitre 5. Editions Quae, Versailles, FR.
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W. F., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. J., ... & White, P. J. (2015). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107–117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- Brown, R. L., Jacobs, L. A., & Peet, R. K. (2007). Species richness: Small scale. In *Encyclopedia of Life Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470015902.a0020488>
- Brown, R., Johnson, L., & White, E. (2023). Temporal Effects of Cover Crop Management on Weed Suppression and Soil Fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78(4), 401–415.
- Bourgeois, B., Munoz, F., Fried, G., Mahaut, L., Armengot, L., Denelle, P., Storkey, J., Gaba, S., & Violle, C. (2019). What makes a weed a weed? A large-scale evaluation of arable weeds through a functional lens. *American Journal of Botany*, 106(1), 90–100. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1213>
- Bourgeois, B., Charles, A., Van Eerd, L. L., Tremblay, N., Lynch, D., Bourgeois, G., Bastien, M., Bélanger, V., Landry, C., & Vanasse, A. (2022). Interactive effects between cover crop management and the environment modulate benefits to cash crop yields: A meta-analysis. *Canadian Journal of Plant Science*, 102(3), 656–667. <https://doi.org/10.1139/cjps-2021-0177>
- Brandsæter, L. O., Heggen, H., Riley, H., Stubhaug, E., & Henriksen, T. M. (2008). Winter survival, biomass accumulation and N mineralization of winter annual and biennial legumes sown at various times of year in Northern temperate regions.

- European Journal of Agronomy, 28(3), 437–448.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.013>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Büchi, L., Mouly, P., Amossé, C., Bally, C., Wendling, M., & Charles, R. (2016). Méthode non destructive d'estimation de la biomasse de couverts végétaux. *Recherche Agronomique Suisse*, 7(3), 136–143.
https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/pdf_archive/2016_03_f_2159.pdf
- Campiglia, E., Radicetti, E., & Mancinelli, R. (2012). Weed control strategies and yield response in a pepper crop (*Capsicum annuum* L.) mulched with hairy vetch (*Vicia villosa* Roth.) and oat (*Avena sativa* L.) residues. *Crop Protection*, 33, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.09.016>
- Caroline Halde. (2017, April 25). Soutenir la transition vers l'agriculture biologique. Policy Options Politiques. <https://policyoptions.irpp.org/fr/magazines/avril-2017/soutenir-la-transition-vers-lagriculture-biologique/>
- Castillo, M. S., Bekewe, P. E., & Rivera, R. (2022). Clover frost-seeding rate effects on productivity and nutritive value of tall fescue pastures during the year of establishment. *Crop Science*, 62(3), 1394–1403.
<https://doi.org/10.1002/csc2.20724>
- Chapin, F. S. III. (1980). The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11, 233–260.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.11.110180.001313>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetrability of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331, 31–43.

- Chen, H., Wang, L., & Liu, Y. (2021). Impact of legumes on soil structure and water retention. *Plant and Soil*, 441(1–2), 123–136.
- Clément, M. F., Angers, D., Bolinder, M. A., N'Dayegamiye, A., & Parent, L.-É. (2010). Chapitre 2 - La gestion de la matière organique du sol. Dans Parent, L.-É. & Gagné, G. (Éds.), *Guide de référence en fertilisation* (2e éd., 473 p.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, QC.
- Coleman, M., Kristiansen, P. E., & Sindel, B. M., Fyfe, C. (2018). Dwarf Nettle (*Urtica urens*): Weed management guide for Australian vegetable production. School of Environmental and Rural Science, University of New England: Armidale, Australia, 12 p.
- Congreves, K. A., Hayes, A., Verhallen, A., & Van Eerd, L. L. (2015). Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012>
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Poorter, H., et al. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335–380. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Cicek, H., Entz, M. H., Thiessen Martens, J. R., & Bullock, P. R. (2014). Productivity and nitrogen benefits of late-season legume cover crops in organic cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(5), 1011–1022. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-130>
- Cordeau, S., & Moreau, D. (2017). Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multiservices : potentiels et limites. *Innovations Agronomiques*, 62, 1–14. <https://doi.org/10.15454/1.5174075019109001E12>
- Couëdel, A., Alletto, L., Tribouillois, H., & Justes, E. (2018). Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure

services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 50–59.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.015>

Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., & Paul, E. (2013). The microbial efficiency matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), 988–995.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12113>

Damour, G., Garnier, E., Navas, M. L., Dorel, M., & Risède, J.-M. (2015). Using functional traits to assess the services provided by cover plants: A review of potentialities in banana cropping systems. *Advances in Agronomy*, 134, 81–133.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.004>

Daubenmire, R. F. (1959). A canopy-coverage method of vegetational analysis. *Northwest Science*, 33, 43–64.

Day, A. D., & Intalap, S. (1970). Some effects of soil moisture stress on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy Journal*, 62(1), 27–29.
<https://doi.org/10.2134/agronj1970.00021962006200010009x>

Delabays, N., & Spring, J.-L. (2002). Le trèfle souterrain : potentialités et limites pour l'enherbement des vignobles. *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 34, 33–34.

Díaz, S., Cabido, M., & Casanoves, F. (1998). Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, 9(1), 113–122.
<https://doi.org/10.2307/3237229>

Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Gorné, L. D., & Wirth, C. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>

Dugas, C. (1975). Le climat et son influence sur l'agriculture abitibienne: sud de la baie de James et partie de l'enclave argileuse de l'Ojibway, Coll. Nordicana. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, n° 39, 121 p.

Dunn, L., Dequiedt, S., Marilleau, N., Lang, C., Djemiel, C., Cottin, A., Horrigue, W., Sadet-Bourgeteau, S., Ranjard, L., & Chemidlin Prévost-Bouré, N. (2025). Impact of farming practices on soil microbial biomass: An international synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 383, Article 109513. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109513>

Environment and Climate Change Canada. (2025). Canadian climate normals and averages(1981–2010). https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_e.html (consulté le 30/12/2025)

Entz, M. H., Guilford, R., & Gulden, R. (2001). Crop yield and soil nutrient status on 14 organic farms in the eastern portion of the Prairie Provinces. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(3), 351–354. <https://doi.org/10.4141/P00-089>

Environnement et Changement climatique Canada. (2020). Canadian Climate Normals 1981–2010: Palmarolle Station / Duhamel-Ouest Station. Gouvernement du Canada. <https://climat.weather.gc.ca>

Fageria, N. K. (2007). Green manuring in crop production. *Journal of Plant Nutrition*, 30(5), 691–719. <https://doi.org/10.1080/01904160701289529>

Fayolle, A. (2008). Structure des communautés de plantes herbacées sur les Grands Causses : Stratégies fonctionnelles des espèces et interactions interspécifiques. Thèse de doctorat, Université de Liège - ULiège, Montpellier SupAgro. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/13519>

Finney, D. M., Murrell, E. G., White, C. M., Baraibar, B., Barbercheck, M. E., Bradley, B. A., Cornelisse, S., Hunter, M. C., Kaye, J. P., Mortensen, D. A., Mullen, C. A., & Schipanski, M. E. (2017). Ecosystem services and disservices are bundled in

simple and diverse cover cropping systems. *Agricultural & Environmental Letters*, 2(1), 170033. <https://doi.org/10.2134/aer2017.09.0033>

Figuerola-Pérez, M. G., Reynoso-Camacho, R., Ramos-Gómez, M., Mendoza-Sánchez, M., & Pérez-Ramírez, I. F. (2024). Impact of temperature and humidity conditions as abiotic stressors on the phytochemical fingerprint of oat (*Avena sativa* L.) sprouts. *Food Chemistry*, 439, 138173. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138173>

Financière Agricole du Québec (FADQ). (2019). Rendements de référence 2019 en assurance récolte. Direction de l'assurance récolte, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 38 p. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-references-2019.pdf>

Financière Agricole du Québec (FADQ). (2020). Rendements de référence 2020 en assurance récolte. Direction de l'assurance récolte, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), 41 p. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-references-2020.pdf>

Flora of North America Editorial Committee. (1993). *Flora of North America: North of Mexico - Vol. 2, Pteridophytes and gymnosperms*. Oxford University Press: Oxford, UK, 496 p.

Flora of North America Editorial Committee. (1997). *Flora of North America: North of Mexico - Vol. 3, Magnoliophyta: Magnoliidae and Hamamelidae*. Oxford University Press: Oxford, UK, 616 p.

Flora of North America Editorial Committee. (2006). *Flora of North America: North of Mexico - Vol. 19, Asteraceae, Part 1*. Oxford University Press: Oxford, UK, 610 p.

Flora of North America Editorial Committee. (2007). *Flora of North America: North of Mexico - Vol. 24, Poaceae, Part 1*. Oxford University Press: Oxford, UK, 944 p.

Flora of North America Editorial Committee. (2013). *Flora of North America: North of Mexico* - Vol. 11, Fabaceae. Oxford University Press: Oxford, UK, 1108 p.

Flora of North America Editorial Committee. (2019). *Flora of North America: North of Mexico* - Vol. 17, Tetrachondraceae to Orobanchaceae. Oxford University Press: Oxford, UK, 768 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). FAOSTAT database: Oats. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (consulté le 08/12/2025)

Fried, G., Armengot, L., Storkey, J., Bourgeois, B., Gaba, S., Violle, C., & Munoz, F. (2021). Do ecological specialization and functional traits explain the abundance–frequency relationship? Arable weeds as a case study. *Journal of Biogeography*, 48(1), 37–50. <https://doi.org/10.1111/jbi.13980>

Fried, G., Blanchet, C., Cazenave, L., Bopp, M. C., Kazakou, E., Metay, A., Cordeau, S., & Rouifed, S. (2022). Consistent response of weeds according to Grime's CSR strategies along disturbance and resource gradients in Bordeaux vineyards. *Weed Research*, 62, 347–359.

Fried, G., Chauvel, B., & Reboud, X. (2008). Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies : vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture. *Innovations Agronomiques*, 3, 15–26.

Fried, G., Kazakou, E., & Gaba, S. (2012). Trajectories of weed communities explained by traits associated with species' response to management practices. *Volume 158*, 147–155.

Fried, G., Norton, L. R., & Reboud, X. (2008). Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 128, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.05.003>

- Gaba, S., Fried, G., Kazakou, E., Chauvel, B., & Navas, M.-L. (2014). Agroecological weed control using a functional approach: a review of cropping systems diversity. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 103–119. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0166-5>
- Gaba, S., Perronne, R., Fried, G., Gardarin, A., Bretagnolle, F., Biju Duval, L., Colbach, N., Cordeau, S., Fernández Aparicio, M., Gauvrit, C., Gibot Leclerc, S., Guillemin, J. P., Moreau, D., Munier Jolain, N., Strbik, F., & Reboud, X. (2017). Response and effect traits of arable weeds in agroecosystems: a review of current knowledge. *Weed Research*, 57(3), 123–147. <https://doi.org/10.1111/wre.12245>
- Gaba, S., Gabriel, E., Chadœuf, J., Bonneau, F., Bretagnolle, V. (2018). Cover crops buffer against vineyard pesticide leaching more effectively than natural vegetation. *Environmental Science & Technology*, 52(1), 183–192.
- Gago, P., Cabaleiro, C., & García, J. (2006). Preliminary study of the effect of soil management systems on the adventitious flora of a vineyard in northwestern Spain. *Crop Protection*, 26, 584–591.
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., & Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., & Métay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>
- Garcia, M., Martinez, P., & Rodriguez, S. (2021). Carbon sequestration potential of cover crops: Insights from a long-term field experiment. *Environmental Management*, 55(3), 301–317.

- Gardarin, A., Celette, F., Naudin, C., Piva, G., Valantin-Morison, M., Vrignon-Brenas, S., Verret, V., & Médiène, S. (2022). Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(39). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x>
- Garnier, E. (2002). Functional ecology: a comparative approach. *Functional Ecology*, 16(2), 187–191.
- Garnier, E., & Navas, M. L. (2012). A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 365–399.
- Garnier, E., Navas, M.-L., & Grigulis, K. (2016). *Plant functional diversity: Organism traits, community structure, and ecosystem properties*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198757368.001.0001>
- Garnier, E., & Cortez, J., Billès, G., Navas, M.-L., Roumet, C., Debussche, M., Toussaint, J.-P., et al. (2004). Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 85, 2630–2637.
- Garnier, E., Navas, M.-L., & Grigulis, K. (2016). *Plant functional diversity: Organism traits, community structure, and ecosystem properties*; Oxford University Press: Oxford, UK, 231 p.
- Georgiou, K., Angers, D., Champigny, R. E., Cotrufo, M. F., Craig, M. E., Doetterl, S., Grandy, A. S., Lavallée, J. M., Lin, Y., Lugato, E., Poeplau, C., Rocci, K. S., Schweizer, S. A., Six, J., & Wieder, W. R. (2025). Soil carbon saturation: What do we really know? *Global Change Biology*, 31(5), e70197. <https://doi.org/10.1111/gcb.70197>
- Gerhards, R. (2018). Weed suppression ability and yield impact of living mulch in cereal crops. *Agriculture*, 8, 39. <https://doi.org/10.3390/agriculture8030039>

- Gitay, H., & Noble, I. R. (1997). What are functional types and how should we seek them? In T. M. Smith, H. H. Shugart, & F. I. Woodward (Eds.), *Plant Functional Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change* (pp. 3–19). Cambridge University Press, Cambridge.
- González, J. M., et al. (2020). Legume intercropping for sustainable weed management and soil fertility. *Agricultural Systems*, 178, 49–58.
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (pp. 201–228). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c9>
- Gregory, A. S., Watts, C. W., Griffiths, B. S., Hallett, P. D., Kuan, H. L., Whitmore, A. P., & Whalley, W. R. (2009). The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma*, 153(1–2), 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.002>
- Guerra, J. G., Cabello, F., Fernández-Quintanilla, C., Peña, J. M., & Dorado, J. (2022). Plant functional diversity is affected by weed management through processes of trait convergence and divergence. *Frontiers in Plant Science*, 13, 993051. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.993051>
- Guerrero-Ramírez, N. R., Mommer, L., Freschet, G. T., Iversen, C. M., McCormack, M. L., Kattge, J., Poorter, H., van der Plas, F., Bergmann, J., Kuyper, T. W., York, L. M., Bruelheide, H., Laughlin, D. C., Meier, I. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., van Ruijven, J., Valverde-Barrantes, O. J., ... Weigelt, A. (2020). Global root traits (GRooT) database. *Global Ecology and Biogeography*, 29(9), 1457–1485. <https://doi.org/10.1111/geb.13179>
- Gupta, N. K., Gupta, S., & Kumar, A. (2001). Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield of wheat cultivars at different

- stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(1), 55–62.
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00457.x>
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (pp. 255–293). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- Halde, C., Gagné, S., Charles, A., & Lawley, Y. (2017). Organic no-till systems in Eastern Canada: A review. *Agriculture*, 7(4), 36.
<https://doi.org/10.3390/agriculture7040036>
- Hardarson, G., Danso, S. K. A., & Zapata, F. (1988). Dinitrogen fixation measurements in alfalfa-ryegrass swards using nitrogen-15 and influence of the reference crop. *Crop Science*, 28(1), 101–105.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800010022x>
- Hartl, W. (1989). Influence of undersown clovers on weeds and on the yield of winter wheat in organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 27(1–4), 389–396. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90099-6)
- Hartwig, U. A. (1998). The regulation of symbiotic N₂ fixation: A conceptual model of N feedback from the ecosystem to the gene expression level. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 1(1), 92–120. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00054>
- Haruna, S. I., Ritchey, E., Mosley, C., & Ku, S. (2023). Effects of cover crops on soil hydraulic properties during commodity crop growing season. *Soil Use and Management*, 39(4), 1253–1263. <https://doi.org/10.1111/sum.12803>
- Hauggaard-Nielsen, H., Mundus, S., & Jensen, E. S. (2012). Grass-clover undersowing affects nitrogen dynamics in a grain legume–cereal arable cropping system. *Field Crops Research*, 136, 23–31.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.001>

- Hauggaard-Nielsen, H., H., & Jensen, E. S. (2005). Facilitative root interactions in intercrops. *Plant and Soil*, 274(1–2), 237–250. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1305-1>
- Haynes, R. J., & Beare, M. H. (1997). Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(11–12), 1647–1653. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071797000783>
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/introduction-to-environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348655-4>
- Ikram, M., Masood, M. U., Monga, V., Ikram, A., Ahmad, T., Ahad, A. M., & Zahid, S. (2025). Evaluating impact of different sowing dates on growth and yield of wheat crop. *Planta Animalia*, 4, 175–184.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (1990). *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec*. Gouvernement du Québec. <https://irda.qc.ca/fr/outils/donnees-pedologiques/inventaire-problemes-degradation-sols-agricoles-quebec/>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2023). *Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : Rapport 1 – État de santé des principales séries de sols cultivées*. <https://irda.qc.ca/media/b0dlmleo/irda-sant%C3%A9solsagricoles-rapport-avril2023.pdf>
- Jamshidi, K., Yousefi, A. R., & Oveisi, M. (2013). Effect of cowpea (*Vigna unguiculata*) intercropping on weed biomass and maize (*Zea mays*) yield. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 41, 180–188. <https://doi.org/10.1080/01140671.2013.807853>
- Joly, A., Bonnet, P., Goëau, H., Barbe, J., Selmi, S., Champ, J., Dufour-Kowalski, S., Affouard, A., Carré, J., Molino, J.-F., Boujemaa, N., & Barthélémy, D. (2016). A look

inside the PI@ntNet experience. *Multimedia Systems*, 22, 751–766.
<https://doi.org/10.1007/s00530-015-0462-9>

Johnson, J. M.-F., Barbour, N. W., & Weyers, S. L. (2007). Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 155–162. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0419>

Juhász, C., Mender-Drienyovszki, N., Magyar-Tábori, K., & Zsombik, L. (2025). Evaluation of chemical weed-control strategies for common vetch (*Vicia sativa* L.) and sweet white lupine (*Lupinus albus* L.) under field conditions. *Agronomy*, 15, 916. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040916>

Kaspar, T. C., & Singer, J. W. (2011). The use of cover crops to manage soil. In R. Lal & B. A. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science: Soil Management* (pp. 321–337). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c21>

Kazakou, E., Fried, G., Richarte, J., Gimenez, O., Violle, C., & Metay, A. (2016). A plant trait based response and effect framework to assess vineyard inter row soil management. *Botany Letters*, 163(4), 373–388. <https://doi.org/10.1080/23818107.2016.1232205>

Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 425–442). ASA and SSSA.

Kraft, N. J. B., Godoy, O., & Levine, J. M. (2015). Plant functional traits and the multidimensional nature of species coexistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(3), 797–802. <https://doi.org/10.1073/pnas.1413650112>

Kramer-Walter, K. R., Bellingham, P. J., Millar, T. R., Smissen, R. D., Richardson, S. J., Laughlin, D. C., & Mommer, L. (2016). Root traits are multidimensional: Specific root length is independent from root

- tissue density and the plant economic spectrum. *Journal of Ecology*, 104(5), 1299–1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12562>
- Kruidhof, H., Bastiaans, L., & Kropff, M. (2008). Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. *Weed Research*, 48, 492–502.
- Lajoie, P. G. (1964). Les sols de l'Abitibi et du Témiscamingue. *Agriculture*, 21, 69–89.
- Lambers, H., & Poorter, H. (1992). Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences. *Advances in Ecological Research*, 23, 187–261. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60148-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60148-8)
- Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
- Lavergne, S., Halde, C., & Lynch, D. (2021). Nitrogen content of pea-based cover crop mixtures and subsequent organic corn yield. *Agronomy Journal*, 113(4), 3532–3547. <https://doi.org/10.1002/agj2.20727>
- Lavergne, S., Vanasse, A., Thivierge, M.-N., & Halde, C. (2021). Using fall-seeded cover crop mixtures to enhance agroecosystem services: A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 4(1), e20161. <https://doi.org/10.1002/agg2.20161>
- Lavorel, S., & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16(5), 545–556. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>

- Ledgard, S. F., & Steele, K. W. (1992). Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil*, 141, 137–153. <https://doi.org/10.1007/BF00011314>
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 60–68. <http://dx.doi.org/10.1038/nature16069>
- Légère, A., Stevenson, F. C., & Benoit, D. L. (2005). Diversity and assembly of weed communities: Contrasting responses across cropping systems. *Weed Research*, 45, 303–315.
- Liebman, M., & Dyck, E. (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications*, 3(1), 92–122. <https://doi.org/10.2307/1941795>
- Liebman, M., & Davis, A. S. (2002). Integrating soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research*, 40, 27–47.
- Lloveras, J., & Iglesias, I. (2002). Morphological development and forage quality changes in crimson clover (*Trifolium incarnatum* L.). *Grass and Forage Science*, 57(1), 50–60. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2001.00289.x>
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 121, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.013>
- Liu, S., Ma, Z., Zhang, Y., Chen, Z., Du, X., & Mu, Y. (2022). The impact of different winter cover crops on weed suppression and corn yield under different tillage systems. *Agronomy*, 12(5), 999. <https://doi.org/10.3390/agronomy12050999>
- Liu, H., Struik, P. C., Zhang, Y., Jing, J., & Stomph, T.-J. (2023). Forage quality in cereal/legume intercropping: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 304, 109174. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109174>

- Lososová, Z., Chytrý, M., Cimalova, S., Kropač, Z., & Otypkova, Z. (2004). Weed vegetation of arable land in Central Europe: Gradients of diversity and species composition. *Journal of Vegetation Science*, 15(3), 415–422.
- Louarn, G., Corre-Hellou, G., Fustec, J., Lô-Pelzer, E., Julier, B., Litrico, I., Hinsinger, P., & Lecomte, C. (2010). Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses. *Innovations Agronomiques*, 11, 79–99.
- MacLaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., & Dehnen-Schmutz, K. (2020). An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 24.
- Mäder, P., Hahn, D., & Dubois, D. (2007). Wheat quality in organic and conventional farming: Results of a 21-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(10), 1826–1835. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2866>
- Maillet, J. (1992). Constitution et dynamique des communautés de mauvaises herbes des vignes de France et des rizières de Camargue (Thèse d'État en Sciences). USTL, Montpellier.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2020). Bilan des ventes de pesticides au Québec – année 2020. Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2021). Plan d'action régional de l'Abitibi-Témiscamingue pour une agriculture durable 2021-2025. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/abitibitemiscamingue/brininfo/Pages/AgriculturedurableplandactiondelAbitibiTemiscamingue.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2023). Plan d'agriculture durable 2020-2030. Gouvernement du Québec

- Garcia, L. (2018). Caractérisation fonctionnelle de cultures de services en vignoble et étude des relations entre marqueurs fonctionnels des communautés végétales et services écosystémiques pour la viticulture (Mémoire de master). Institut Agro Montpellier. <https://institut-agro-montpellier.hal.science/tel-03791484v1>
- Martin, S., Green, D., & Rodriguez, M. (2022). Legumes in cover cropping: Enhancing soil microbial diversity for sustainable agriculture. *Applied Soil Ecology*, 155, 103703. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103703>
- Mason, H. E., & Spaner, D. (2006). Competitive ability of wheat in conventional and organic management systems: A review of the literature. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(2), 333–343. <https://doi.org/10.4141/P05-051>
- Matamoros, M. A., Baird, L. M., Escuredo, P. R., Dalton, D. A., Minchin, F. R., Iturbe-Ormaetxe, I., Rubio, M. C., Moran, J. F., Gordon, A. J., & Becana, M. (2003). Stress-induced legume root nodule senescence: Physiological, biochemical, and structural alterapportns. *Plant Physiology*, 132(3), 1515–1522. <https://doi.org/10.1104/pp.103.022594>
- McClelland, S. C., Paustian, K., & Schipanski, M. E. (2021). Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Ecological Applications*, 31(3), e02278. <https://doi.org/10.1002/eap.2278>
- McCracken, D. V., Smith, M. S., Grove, J. H., MacKown, C. T., & Blevins, R. L. (1994). Nitrate leaching as influenced by cover cropping and nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1476–1483.
- Merfield, C. N. (2023). Integrated weed management in organic farming. In *Organic Farming (Second Edition)* (pp. 31–109). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99145-2.00004-5>
- Metay, A., Garcia, L., Kazakou, E., & Fried, G. (2022). Effet des couverts sur la flore en viticulture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.54800/prt789>

- Mohanty, M., Reddy, K. S., Probert, M. E., Dalal, R. C., Rao, A. S., & Menzies, N. W. (2011). Modelling N mineralization from green manure and farmyard manure from a laboratory incubation study. *Ecological Modelling*, 222(3), 719–726. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.027>
- Mohler, C. L., & Liebman, M. (1987). Weed productivity and composition in sole crops and intercrops of barley and field pea. *Journal of Applied Ecology*, 24(2), 685–699. <https://doi.org/10.2307/2403903>
- Moreno Cadena, P., Salmeron, M., Pecci Canisares, L., & Poffenbarger, H. (2024). Productivity benefits of cereal–legume cover crop mixtures under variable soil nitrogen and termination times. *European Journal of Agronomy*, 155, 127114. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127114>
- Mullen, M. D., Melhorn, C. G., Tyler, D. D., & Duck, B. N. (1998). Biological and biochemical soil properties in no-till corn with different cover crops. *Journal of Soil and Water Conservation*, 53(3), 219–224. <https://doi.org/10.1080/00224561.1998.12457222>
- Mukherjee, D. (2012). Effect of different sowing dates on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars under mid hill situation of West Bengal. *Indian Journal of Agronomy*, 57, 152–156.
- Mortensen, E. Ø., De Notaris, C., Peixoto, L., Olesen, J. E., & Rasmussen, J. (2021). Short-term cover crop carbon inputs to soil as affected by long-term cropping system management and soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 311, 107339. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107339>
- Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., & Jeuffroy, M.-H. (2010). The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research*, 119(1), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.002>

- N'Dayegamiye, A., Giroux, M., & Gasser, M.-O. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteurs climatiques et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote [Présentation]. Colloque sur l'azote, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) – Ordre des agronomes du Québec (OAQ). https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/NDayegamiye_A_resume_PPT.pdf
- N'Dayegamiye, A., Whalen, J. K., Tremblay, G., Nyiraneza, J., Grenier, M., Drapeau, A., & Bipfubusa, M. (2015). The benefits of legume crops on corn and wheat yield, nitrogen nutrition, and soil properties improvement. *Agronomy Journal*, 107(5), 1653–1665. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0416>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods* (pp. 961–1010). Soil Science Society of America.
- Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R., & Govaerts, B. (2015). Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research*, 183, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>
- Office des normes générales du Canada. (2018). *Systèmes de production biologique : principes généraux et normes de gestion (CAN/CGSB-32.310-2018)*. Conseil canadien des normes & Office des normes générales du Canada. <https://publications.gc.ca/pub?id=9.854644&sl=1>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
- Peng, F., Wu, Y., Liu, X., Zhang, Y., & Yang, Y. (2023). Plant C:N rapport predicts community composition changes under N addition in an alpine meadow. *Journal of Ecology*, 111(3), 589–600. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14048>

- Peratoner, G., & Pötsch, E. M. (2019). Methods to describe the botanical composition of vegetation in grassland research. *Die Bodenkultur: J. Land Manag. Food Environ.*, 70, 1–18. <https://doi.org/10.2478/boku-2019-0001>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornelissen, J. H. C., et al. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.*, 61, 167–234.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornelissen, J. H. C., et al. (2016). Corrigendum - New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.*, 64, 715–716.
- Pisarčík, M., D'Haene, K., Sleutel, S., & Cougnon, M. (2024). Role of cover crop roots in soil organic carbon accrual—A review. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.13532>
- Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestrapporntn in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- Poirier, V., Roumet, C., & Munson, A. D. (2018). The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 246–259. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300658>
- Poirier, V., Roumet, C., Angers, D. A., & Munson, A. D. (2018). Species and root traits impact macroaggregation in the rhizospheric soil of a Mediterranean common garden experiment. *Plant and Soil*, 424(1–2), 289–302.
- Preston, C. M., & Trofymow, J. A. (2015). The chemistry of some foliar litters and their sequential proximate analysis fractions. *Biogeochemistry*, 126, 197–209. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0152-x>

- Pridham, J. C. (2006). The effect of intercropping systems and cultivar mixtures on weed and disease suppression in organically managed spring wheat (Master's thesis, University of Manitoba). University of Manitoba. <https://hdl.handle.net/1993/29677>
- Phillips, R., Brzostek, E., & Midgley, M. (2013). The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon–nutrient couplings in temperate forests. *New Phytologist*, 199, 41–51. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.12221>
- Poorter, H., & Remkes, C. (1990). Leaf area rapport and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. *Oecologia*, 83, 553–559.
- Puget, P., & Drinkwater, L. E. (2001). Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from leguminous green manures. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 771–779. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653771x>
- Queen, A., Earl, H., & Deen, W. (2009). Light and moisture competition effects on biomass of red clover underseeded to winter wheat. *Agronomy Journal*, 101(6), 1511–1521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0163>
- Quemada, M., & Cabrera, M. L. (1995). Carbon and nitrogen mineralized from leaves and stems of four cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2), 471–477. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020029x>
- Raunkiaer, C. (1934). The life forms of plants and statistical plant geography: Being the collected papers of C. Raunkiaer. Clarendon Press. <https://openlibrary.org/works/OL35307253W>
- R Core Team. (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online: <https://www.R-project.org/>

- Rasse, D., Rumpel, C., & Dignac, M.-F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil*, 269, 341–356. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
- Reboud, X., Bedoussac, L., Cellier, V., Cordeau, S., Delzon, S., Leclerc, M., & Jouan, J. (2022). Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides – Chapitre 6. In *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable*; Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Malausa, T., Reboud, C., Huyghe, C., Eds.; Éditions Quae: Versailles, France, pp. 117–194.
- Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2, 15221. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- Robert, L. (2016). Le trèfle incarnat comme intercalaire dans les céréales. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/articles/agroenvironnement/Pages/Le_trefle_incarnat_comme_intercalaire_dans_les_cereales.aspx
- Rosolem, C. A. (2002). Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 109–115.
- Saraswat, A., Tian, J., Hraiz, F. M. S. J., & Kumar, A. (2025). Root and Leaf Traits of Alfalfa Exhibit Distinct Responses to Soil Microbial Communities and Environmental Stresses. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(1), e70038. <https://doi.org/10.1002/sae2.70038>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Schipanski, M. E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., Kemanian, A. R., Mortensen, D. A., Ryan, M. R., Tooker, J., & White, C. (2014). A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in

agroecosystems. *Agricultural Systems*, 125, 12–22.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.004>

Schlueter, D., & Tracy, B. (2012). Sowing Method Effects on Clover Establishment into Permanent Pasture. *Agronomy Journal*, 104(5), 1217–1222.
<https://doi.org/10.2134/agronj2012.0035>

Schneider, C.A.; Rasband, W.S.; Eliceiri, K.W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods*, 9, 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*; University of Illinois Press: Urbana, IL, USA, 125 p.

Sias, C., Wolters, B. R., Reiter, M. S., & Flessner, M. L. (2021). Cover crops as a weed seed bank management tool: a soil down review. *Italian Journal of Agronomy*, 16, 4. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1852>

Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 681–689.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>

Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1042–1049. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>

Smith, C., Johnson, L., & Brown, E. (2021). Impact of Legume Roots on Soil Structure and Water Retention: A Meta-Analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 169, 101–115.

Smith, H. J. C., Levy, G. J., & Shainberg, I. (1990). Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1084–1087.

- Smith, R. G., & Gross, K. L. (2007). Assembly of weed communities along a crop diversity gradient. *Journal of Applied Ecology*, 44(5), 1046–1056. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01328.x>
- Smith, R. G., Warren, N. D., & Cordeau, S. (2020). Are cover crop mixtures better at suppressing weeds than cover crop monocultures? *Weed Science*, 68(2), 186–194. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.12>
- Smith, R. G., Lounsbury, N. P., & Palmer, S. A. (2023). Mechanisms of Weed Suppression by Cover Crops, Intercrops, and Mulches – Chapter 10. In *Weed Management in Organic Agriculture*; Korres, N. E., Travlos, I. S., Gitsopoulos, T. K., Eds.; John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA, pp. 172–195. <https://doi.org/10.1002/9781119709763.ch10>
- Smith, J., Brown, A., & Jones, C. (2022). Impact of Cover Crop Diversity on Soil Structure and Water Retention. *Journal of Soil Science*, 45(2), 201–215.
- Snapp, S. S., et al. (2005). Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal*, 97(1), 322–332. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0322>
- Spellerberg, I. F., & Fedor, P. J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon–Wiener’ Index. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 177–179.
- Stevenson, F. C., Légère, A., Simard, R. R., Angers, D. A., Pageau, D., & Lafond, J. (1997). Weed species diversity in spring barley varies with crop rotation and tillage, but not with nutrient source. *Weed Science*, 45, 798–806. <https://doi.org/10.1017/S0043174500088998>
- Stoate, C., Báldi, A., Beja, P., Boatman, N. D., Herzon, I., van Doorn, A., de Snoo, G. R., Rakosy, L., & Ramwell, C. (2017). Ecological intensification: bridging the gap between science and practice. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 1–6. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12762>

- Stoate, C., Buckwell, A., Glimmerveen, N., Rundlöf, M., Senapathi, D., Potts, S. G., ... & Smith, H. G. (2017). Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – a review. *Journal of Environmental Management*, 203, 46–52.
- Suding, K. N., Higgs, E., Palmer, M., Callicott, J. B., Anderson, C. B., Baker, M., Gutrich, J. J., Hondula, K. L., LaFevor, M. C., Larson, B. M. H., Randall, A., Ruhl, J. B., & Schwartz, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348(6235), 638–640. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4216>
- Sulaiman, S., Ullah, S., Saud, S., Liu, K., Harrison, M. T., ... & Fahad, S. (2023). Germination response of oat (*Avena sativa* L.) to temperature and salinity using halothermal time model. *Plant Stress*, 10, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100263>
- Sullivan, C. S., Machado, S., & Wuest, S. B. (2024). Winter cover cropping to improve soil health in semiarid, irrigated cropping systems of Central Oregon. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7, e20481. <https://doi.org/10.1002/agg2.20481>
- Subedi, K. D., Ma, B. L., & Xue, A. G. (2007). Planting date and nitrogen effects on grain yield and protein content of spring wheat. *Crop Science*, 47(1), 36–44. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.02.0099>
- Suter, M., Connolly, J., Finn, J. A., Loges, R., Kirwan, L., Sebastià, M.-T., & Lüscher, A. (2015). Nitrogen yield advantage from grass–legume mixtures is robust over a wide range of legume proportions and environmental conditions. *Global Change Biology*, 21(6), 2424–2438. <https://doi.org/10.1111/gcb.12880>
- Statistique Canada. (2018). Estimation de la superficie, du rendement, de la production, du prix moyen à la ferme et de la valeur totale à la ferme des principales grandes cultures, en unités métriques et impériales. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210035901>
- Tautges, N. E., Chiartas, J. L., Gaudin, A. C. M., O'Geen, A. T., Herrera, I., & Scow, K. M. (2019). Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops on soil organic

carbon are greater in Mediterranean climates. *Global Change Biology*, 25(11), 3753–3766. <https://doi.org/10.1111/gcb.14762>

Teasdale, J. R. (1996). Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture*, 9(4), 475–479. <https://doi.org/10.2134/jpa1996.0475>

Teasdale, J. R., Brandsæter, L. O., Calegari, A., & Neto, F. S. (2007). Cover crops and weed management. In M. K. Upadhyaya & R. E. Blackshaw (Eds.), *Non-chemical weed management: Principles, concepts and technology* (pp. 49–64). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845932909.0049>

Teasdale, J. R., Coffman, C. B., & Mangum, R. W. (2007). Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agronomy Journal*, 99(5), 1297–1305. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0362>

Teasdale, J. R., Mangum, R. W., Radhakrishnan, J., & Cavigelli, M. A. (2004). Weed seedbank dynamics in three organic farming crop rotations. *Agronomy Journal*, 96(5), 1429–1435. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1429>

Thilakarathna, M. S., Serran, S., Lauzon, J., Janovicek, K., & Deen, B. (2015). Management of manure nitrogen using cover crops. *Agronomy Journal*, 107(4), 1595–1607. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0634>

Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (1985). *Soil fertility and fertilizers* (4th ed.). Macmillan Publishing Company. <https://www.worldcat.org/search?q=Soil+fertility+and+fertilizers+Tisdale+Nelson+Beaton>

Tribouillois, H., Fort, F., Cruz, P., Charles, R., Flores, O., Garnier, E., & Justes, E. (2015). A functional characterisation of a wide range of cover crop species: Growth and nitrogen acquisition rates, leaf traits and ecological strategies. *PLoS ONE*, 10, e0122156. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122156>

- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, D., Chèneby, D., & Nicolardot, B. (2000). Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 918–926. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643918x>
- Travlos, I., Gazoulis, I., Kanatas, P., Tsekoura, A., Zannopoulos, S., & Papastylianou, P. (2020). Key factors affecting weed seeds' germination, weed emergence, and their possible role for the efficacy of false seedbed technique as weed management practice. *Frontiers in Agronomy*, 2, Article 1. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.00001>
- Tremblay, M.-È., & Gasser, M.-O. (2018). Favoriser l'implantation du trèfle comme culture intercalaire dans les céréales à paille : Un réseau panquébécois de vitrines à la ferme. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-2015-015_Rapport.pdf
- Truong, T. H. H., & Marschner, P. (2018). Respirapportn, available N and microbial biomass N in soil amended with mixes of organic materials differing in C/N rapport and decomposition stage. *Geoderma*, 319, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.012>
- Uchino, H.; Iwama, K.; Jitsuyama, Y.; Yudate, T.; Nakamura, S. (2009). Yield losses of soybean and maize by competition with interseeded cover crops and weeds in organic-based cropping systems. *Field Crops Res.*, 113, 342–351. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.013>
- Van Stappen, F., Lories, A., Mathot, M., Planchon, V., Stilmant, D., & Debode, F. (2015). Organic versus conventional farming: The case of wheat production in Wallonia (Belgium). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.047>

- Vannasse, A., Thibaudeau, S., & Weil, A. (2022). Guide des cultures de couvertures en grandes cultures; Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ): Québec, Canada, 204 p.
- Vendig, I., Guzman, A., De La Cerda, G., Esquivel, K., Mayer, A. C., Ponisio, L., & Bowles, T. M. (2023). Quantifying direct yield benefits of soil carbon increases from cover cropping. *Nature Sustainability*, 6(9), 1125–1134. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01131-7>
- Verret, V., Gardarin, A., Pelzer, E., Médiène, S., Makowski, D., & Valantin-Morison, M. (2017). Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 204, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.010>
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- Vrignon-Brenas, S., Celette, F., Piquet-Pissaloux, A., Corre-Hellou, G., & David, C. (2018). Intercropping strategies of white clover with organic wheat to improve the trade-off between wheat yield, protein content and the provision of ecological services by white clover. *Field Crops Research*, 224, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.009>
- Werner, C. M., Stuble, K. L., Groves, A. M., & Young, T. P. (2020). Year effects: Interannual variation as a driver of community assembly dynamics. *Ecology*, 101, e03104. <https://doi.org/10.1002/ecy.3104>
- Westoby, M. (2025). Trait based ecology, trait free ecology, and in between. *New Phytologist*, 245(1), 33–39. <https://doi.org/10.1111/nph.20197>
- Wilson, C. V. (1973). Le climat du Québec : Partie I, atlas climatologique du Québec; Partie II, mise en application des renseignements climatologiques. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique. <https://publications.gc.ca/>

- Wilson, P. J., Thompson, K., & Hodgson, J. G. (1999). Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist*, 143, 155–162.
- Wood, S. A., Karp, D. S., DeClerck, F., Kremen, C., Naeem, S., & Palm, C. A. (2015). Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.013>
- Wright, I. J., Dong, N., Maire, V., Prentice, I. C., Westoby, M., Díaz, S., Gallagher, R. V., Jacobs, B. F., Kooyman, R., ... & Wilf, P. (2017). Global climatic drivers of leaf size. *Science*, 357(6354), 917–921. <https://doi.org/10.1126/science.aal4760>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Midgley, J. J., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Willer, H., Trávníček, J., & Schlatter, B. (Eds.). (2025). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2025*. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL) and IFOAM – Organics International. Frick, Switzerland, and Bonn, Germany. <https://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2025.html>
- Yang, J., Yi, J., Ma, S., Wang, Y., Song, J., Li, S., Feng, Y., Sun, H., Gao, C., Yang, R., Li, Z., Cao, Y., & Yang, P. (2024). Integrated physiological, metabolomic, and transcriptomic analyses elucidate the regulation mechanisms of lignin synthesis under osmotic stress in alfalfa leaf (*Medicago sativa* L.). *BMC Genomics*, 25, 88. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10039->
- Yue, K., Jarvie, S., Senior, A. M., Van Meerbeek, K., Peng, Y., Ni, X., Wu, F., & Svenning, J.-C. (2020). Changes in plant diversity and its relationship with productivity in response to nitrogen addition, warming and increased rainfall. *Oikos*, 129, 939–952. <https://doi.org/10.1111/oik.07006>

- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zarza, R., Rebuffo, M., La Manna, A., & Balzarini, M. (2020). Red clover (*Trifolium pratense* L.) seedling density in mixed pastures as predictor of annual yield. *Field Crops Research*, 256, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107925>
- Zhang, H., Liu, C., Mao, L., Li, Y., & Shen, Y. (2023). Divergent response of hay and grain yield of oat: effects of environmental factors and sowing rate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103, 233–242. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12135>
- Zhang, X., & Wang, W. (2015). The decomposition of fine and coarse roots: their global patterns and controlling factors. *Scientific Reports*, 5, 9940. <http://dx.doi.org/10.1038/srep09940>
- Zhu, W., & Barros, J. (2025). Tissue specific developmental changes in lignin deposition in model plants. *Physiologia Plantarum*, 177(6), e70607. <https://doi.org/10.1111/ppl.70607>
- Ziadi, N., Chantigny, M., & Bélanger, G. (2022). Fertilisation des plantes fourragères pérennes. Dans *Guide de production – Plantes fourragères* (2e éd., Vol. 1, pp. 102–132). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. ISBN 978-2-7649-0636-1.