



Rapport final 20-006-3.1-S-IRDA

ÉTAT DE SANTÉ DU SOL APRÈS L'IMPLANTATION DE STRATÉGIES DIVERSIFIÉES DE CULTURES DE COUVERTURE EN PRODUCTIONS MARAÎCHÈRES HÂTIVES ET TARDIVES.

Date : 10 novembre 2025

Responsable scientifique : Christine Landry, agronome, Ph. D.

Ce rapport a été produit à l'attention du Programme Prime-Vert, sous-volet 3.1 du MAPAQ



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Christine Landry

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

christine.landry@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc., IRDA

Julie Mainguy, agr., B. Sc., IRDA

Mélissa Paradis, M.Sc., IRDA

Christine Landry, agr., Ph. D., IRDA

Équipe de réalisation

Christine Landry, agr., Ph. D., IRDA

Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc., IRDA

Julie Mainguy, agr., B. Sc., IRDA

Aurélie Demers, agr., B.Sc., IRDA

Julie Forest-Drolet M.Sc., IRDA

Francis-Olivier Lortie, T. A., IRDA

Mathieu Leblanc, stagiaire, IRDA

Pédologie

Catherine Bossé agr. B.Sc., IRDA

Maude Lapointe agr. B.Sc., IRDA

Collaborateurs

Entreprise

Clément Gosselin et Marc-André Gosselin,
Ferme Mireille et Clément Gosselin

Agronomie

Denis Giroux, agr., Réseau de Lutte intégrée
Bellechasse

Karl-José Eyebiyie, agr., MAPAQ-DRCA

Laboratoire

Agro Enviro Lab

Merci à nos partenaires financiers

Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert – Appui au développement expérimental, à l'adaptation technologique et au transfert technologique des connaissances en agroenvironnement grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Des remerciements s'adressent également aux producteurs de la Ferme Mireille et Clément Gosselin, au Réseau de Lutte Intégrée Bellechasse et à l'IRDA qui ont fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude.

Québec 

Ce rapport peut être cité comme suit :

Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Paradis, M. et Landry, C. 2025. État de santé du sol après l'implantation de stratégies diversifiées de cultures de couverture en productions maraîchères hâtives et tardives. Rapport final. IRDA et partenaires. 69 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Remerciements

Les auteurs remercient les producteurs Clément Gosselin et Marc-André Gosselin de l'entreprise Ferme Mireille et Clément Gosselin pour leur implication dans le projet et pour avoir permis la réalisation des essais. Les remerciements s'adressent également à Denis Giroux, agronome, pour sa collaboration à l'idéation du projet et aux essais en champ, ainsi que pour la révision du rapport. Les remerciements s'étendent à Karl-José Eyebiyie, agronome au MAPAQ de la Direction de la Chaudière-Appalaches. Enfin, les remerciements s'adressent au personnel du Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA ainsi qu'aux étudiants d'étés 2021 à 2023 ayant participé aux diverses tâches terrain.

TABLE DES MATIERES

1	Faits saillants	1
2	Description du projet	2
2.1	Mise en contexte	2
2.2	Objectifs	4
3	Matériel et méthodes	5
3.1	site et traitements	5
3.1.1	Description du site	5
3.1.2	Séquence des rotations et traitements	5
3.2	Dispositif expérimental et analyses statistiques	10
3.3	Collecte des données et analyses de laboratoire	11
3.3.1	Analyse pédologique des sols	11
3.3.2	Caractérisation physico-chimique des sols	12
3.3.3	Caractérisation des biomasses et évaluation des rendements	13
3.4	Coûts et bénéfices	15
4	Résultats et discussion	16
4.1	Conditions météorologiques	16
4.2	Contexte pédologique	17
4.2.1	Description initiale en début de rotation (2021)	17
4.3	Caractérisation de la santé globale du sol en début de rotation	20
4.4	Croissance des cultures de couvertures et rendement en maïs sucré	21
4.4.1	Rotation avec maïs sucré hâtif	21
4.4.2	Dispositif avec maïs sucré tardif	29
4.5	impacts du paillis fauché-récolté et arrière-effet des cultures de couvertures	36
4.5.1	Caractérisation et impacts du paillis fauché-récolté	36
4.5.2	Impacts de la rotation sur le contrôle des mauvaises herbes	40
4.5.3	Impact de la rotation sur les rendements en brocolis	41
4.6	Évolution de la santé globale des sols pendant les rotations	44
4.6.1	Sol du dispositif hâtif de 2021 à 2023	45
4.6.2	Sol du dispositif tardif de 2021 à 2023	48
4.7	Évolution du statut structural du sol à la fin des rotations (2023)	51
4.8	Coûts et bénéfices	54
4.8.1	Limites de l'étude économique	54
5	Conclusion	56
6	Références	57
	Annexe A – Impact du paillis sur l'apport en N disponible à la culture de brocolis	63
	Annexe B – Résultats détaillés des profils réalisés	65

Liste des tableaux

Tableau 1. Séquence des rotations et dates des principales opérations culturales pendant les trois années de l'étude.	7
Tableau 2. Variétés et taux de semis des cultures de couverture intégrées dans les rotations des dispositifs avec maïs sucré hâtif et avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.....	10
Tableau 3. Granulométrie de l'horizon de surface (0-20 cm) des différentes répétitions (blocs) des dispositif hâtif et tardif.....	19
Tableau 4. Résultats de l'IQPSM des deux profils réalisés avant l'implantation des dispositifs	20
Tableau 5. Caractérisation de la santé globale du sol en début de rotation dans chacun des dispositifs hâtif ou tardif, le 4 août 2021.	21
Tableau 6. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s.)) des cultures de couverture (CC) du dispositif hâtif (contenus en azote (N), $C_{soluble}$, C/N et indice de stabilité biologique (ISB) ainsi que les prélèvements en éléments totaux C, N et estimé en N disponible), avant les gelées d'automne (15 octobre 2021), en post-récolte du maïs sucré hâtif (automne 2022) et juste avant la fauche des prairies (13 juin 2023).....	23
Tableau 7. Caractéristiques de la biomasse sèche des cannes de maïs du dispositif hâtif (contenus en carbone (C), azote (N), $C_{soluble}$, C/N et indice de stabilité biologique (ISB) ainsi que les prélèvements en éléments totaux C, N, phosphore (P), potassium (K) et estimé en N disponible), en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), à la fin de la saison de croissance (19 août 2022).	24
Tableau 8. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s.)) des cultures de couverture (CC) du dispositif tardif (contenus en azote (N), $C_{soluble}$, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux C, N et estimé en N disponible), avant les gelées d'automne (15 octobre 2021) et avant la fauche (7 juin 2022), ainsi qu'à la fin de la saison de croissance (17 octobre 2022).....	30
Tableau 9. Caractéristiques de la biomasse sèche des cannes de maïs (contenus en carbone (C), azote (N), $C_{soluble}$, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N, phosphore (P), potassium (K) et estimé en N disponible), à la fin de la saison de croissance (12 septembre 2022), en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), dans le dispositif tardif.....	32
Tableau 10. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s.)) du mélange provenant de la prairie intercalaire et de la prairie post-récolte produite dans le dispositif hâtif (contenus en azote (N), $C_{soluble}$, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)), ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N et estimé en N disponible) et caractéristiques de la biomasse de fauché-récolté apportée comme paillis dans les entre-rangs de brocolis du dispositif tardif (13 juin 2023).....	37
Tableau 11. Évolution de la santé globale des sols de la rotation avec maïs sucré hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), de 2021 à 2023.	46
Tableau 12. Évolution de la santé globale des sols de la rotation avec maïs sucré tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, de 2021 à 2023.	49
Tableau 13. Résumé de l'IQPSM ¹ des différents traitements (Ap1 et Ap2)	53
Tableau 14. Coûts d'implantations des cultures de couverture et gain net à l'échelle de la rotation pour le dispositif avec maïs sucré hâtif ou avec maïs sucré tardif de 2021 à 2023.	55
Tableau 15. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif avec le traitement Prairie inter (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.....	65
Tableau 16. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif hâtif avec le traitement Prairie post (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.....	66
Tableau 17. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif hâtif dans le traitement Sol nu (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.....	66
Tableau 18. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Raygrass inter, sans et avec paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.	67
Tableau 19. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Trèfle inter, sans et avec paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.	68
Tableau 20. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Sol nu, sans paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.....	68

Liste des figures

Figure 1. Schéma des dates importantes d'implantations et de récoltes des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.....	8
Figure 2. Résumé en images des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.....	9
Figure 3 : Schéma des dispositifs des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, pour 2021 à 2023.....	11
Figure 4. Localisation des profils de sols réalisés en 2021 (rouge) et en 2023 (bleu).....	12
Figure 5. Données météorologiques (station de Saint-Antoine-de-Tilly) pendant la saison de croissance en 2022.....	16
Figure 6. Données météorologiques (station de Saint-Antoine-de-Tilly) pendant la saison de croissance des brocolis en 2023.	17
Figure 7. Répartition géographique de la série de sols Saint-Nicolas.	18
Figure 8. Triangle des classes texturales de sols avec positionnement des textures des dispositifs hâtif et tardif.	19
Figure 9. Profils complets avant l'implantation des dispositifs en 2021.	19
Figure 10. Biomasse produite dans le dispositif hâtif avec le mélange Avoine-Pois avant les gelées d'automne (15 octobre 2021) (à gauche), ainsi que par la prairie semée en intercalaire ou en post-récolte dans le maïs sucré en 2022, juste avant la fauche l'année suivante (13 juin 2023) (à droite).....	23
Figure 11. Concentration en N-NO ₃ du sol en 2022 suivant l'incorporation de la culture de couverture (CC) avoine-pois, au stade 4-6 feuilles du maïs, juste avant le fractionnement de l'engrais N, dans le dispositif hâtif, le 23 juin 2022.	24
Figure 12. Aspect général des tiges de maïs à la récolte dans le dispositif hâtif et aperçu de la prairie semée en intercalaire (11 août 2022).....	25
Figure 13. Recouvrement en mauvaises herbes (%) au stade soies (22 juillet 2022), à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) et avant les gelées d'automne (17 octobre 2022), dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	26
Figure 14. Croissance des mauvaises herbes à différents moments pendant la saison de croissance 2022 dans le dispositif avec maïs sucré hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	26
Figure 15. Rendements totaux en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC)	27
Figure 16. Taux d'épis déclassés (%) à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).....	28
Figure 17. Qualité des grains après la récolte (11 août 2022), pour six épis vendables par parcelle, dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	28
Figure 18. Concentration en nitrate (N-NO ₃) résiduel du sol du dispositif hâtif à la fin de la saison a) 2021 (15 octobre) et b) 2022 (17 octobre 2022) en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	29
Figure 19. Prairie implantée dans le dispositif tardif après la fraisière en 2021 (15 octobre 2021) et juste avant la fauche l'année suivante (7 juin 2022).	31
Figure 20. Concentration en N-NO ₃ du sol en fonction du traitement sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC, prairie implantée à la dérobée en 2021), au stade 4-6 feuilles du maïs, juste avant le fractionnement de l'engrais et les semis des cultures de couverture en intercalaire (CCI), le 15 juillet 2022.	31
Figure 21. Aspect général des tiges de maïs à la récolte dans le dispositif tardif, le 12 septembre 2022.	32
Figure 22. Recouvrement des mauvaises herbes (%) au stade soies (17 août 2022), à la récolte du maïs sucré (9 septembre 2022) et en fin de saison (17 octobre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	33
Figure 23. Croissance des mauvaises herbes à différents moments pendant la saison de croissance 2022 dans le dispositif avec maïs sucré tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).....	33
Figure 24. Rendements totaux en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC)	34

Figure 25. Rendements vendables en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).....	34
Figure 26. Taux d'épis déclassés (%) à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	35
Figure 27. Évaluation de la qualité des grains après la récolte (12 septembre 2022), pour six épis vendables par parcelles, dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).	35
Figure 28. Concentration en nitrate (N-NO ₃) résiduel du sol du dispositif tardif en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), à la fin de la saison de croissance le 15 octobre 2021 (a) et le 17 octobre 2022 (b).	36
Figure 29. Fauche, application et épaisseur du paillis appliqué dans les entres-rangs de brocolis du dispositif tardif (13 juin 2023).	37
Figure 30. Évolution de la dégradation du paillis de prairie fauché-récolté une semaine après son application (20 juin 2023), jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).	38
Figure 31. Teneurs en eau du sol à 5 cm de profondeur en fonction des traitements (Sol nu, Raygrass inter + paillis et Raygrass inter sans paillis) et des précipitations, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).	39
Figure 32. Teneurs en eau du sol à 15 cm de profondeur en fonction des traitements (Sol nu, Raygrass inter + paillis et Raygrass inter sans paillis) et des précipitations, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).	39
Figure 33. Recouvrement des mauvaises herbes (%) en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).	40
Figure 34. Recouvrement des mauvaises herbes en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).	41
Figure 35. Rendements en brocolis en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, lors de la récolte dans le dispositif tardif (17 juillet 2023).	43
Figure 36. Aperçu du champ de l'essai en brocolis pendant la croissance et à la récolte, dans le dispositif tardif en 2023.	43
Figure 37. Reprise du ray-grass annuel dans le dispositif tardif avant la plantation des brocolis, le 9 mai 2023.	44
Figure 38. Concentration en N-NO ₃ du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, 2 semaines après l'application du paillis fauché-récolté dans les brocolis.	44
Figure 39. Concentration en carbone organique soluble (C _{eau}) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (22 juillet 2022) et à la fin des suivis (17 juillet 2023), dans le dispositif hâtif.	47
Figure 40. Potentiel de fourniture en nitrate (N-NO ₃) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (22 juillet 2022) et à la fin des suivis (17 juillet 2023), dans le dispositif hâtif.	47
Figure 41. Concentration en carbone organique soluble (C _{eau}) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (17 août 2022) et à la récolte des brocolis (17 juillet 2023), dans le dispositif tardif.	50
Figure 42. Potentiel de fourniture en nitrate (N-NO ₃) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (17 août 2022) et à la récolte des brocolis (17 juillet 2023), dans le dispositif tardif.	51
Figure 43. Profils à la fin de la rotation en 2023 dans le traitement Prairie post-récolte du dispositif hâtif et à la fin de la rotation en 2023 dans le traitement Raygrass intercalaire du dispositif tardif.	53
Figure 44. Flux de N-NO ₃ du sol des parcelles avec ou sans paillis de fauché-récolté et avec antécédent de ray-grass intercalaire dans le maïs sucré (2022) ou dans les parcelles de sol nu, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu'à la récolte du brocoli (17 juillet 2023).	63

Figure 45. Concentration en N-NO₃ du sol des parcelles avec ou sans paillis de fauché-récolté et avec antécédent de ray-grass intercalaire dans le maïs sucré (2022) ou dans les parcelles de sol nu, à trois moments pendant la saison de croissance des brocolis (2023)..... 64

1 FAITS SAILLANTS

L'impact de différentes stratégies de cultures de couverture (CC) et de paillis frais fauché-récolté sur la santé des sols et la performance agronomique en production maraîchère conventionnelle a été testé dans deux dispositifs distincts : avec du maïs sucré hâtif et avec du maïs sucré tardif. Dans le dispositif hâtif, des CC annuelles ont été implantées après une fraisière, suivies d'un maïs sucré hâtif et d'une prairie vivace (intercalaire ou post-récolte) en 2022, fauchée en juin de la troisième année (2023). Dans le dispositif tardif, une prairie vivace implantée en 2021 après la fraisière a été suivie d'un maïs sucré tardif en 2022 avec CC annuelles intercalaires (CCI) (trèfle ou ray-grass annuel (raygrass)), suivi d'une culture de brocolis en 2023, incluant ou non du paillis fauché-récolté provenant de la prairie du dispositif hâtif. Pour chacun des dispositifs, tout au long des rotations (3 ans), un traitement avec sol nu (sans CC ni paillis) était également inclus pour comparaisons.

- **Amélioration de la structure et de la santé globale du sol :**

Trois ans après la fraisière, la colonisation racinaire dans tous les sols des traitements, incluant le sol nu, a permis une amélioration de la qualité structurale, surtout dans l'horizon Ap2 ($\approx 10-30$ cm). Toutefois, l'inclusion des CC ou du paillis, dans les deux rotations (hâtive et tardive), n'a pas permis d'améliorer concrètement les cotes physiques, biologiques ou chimiques du sol telles que mesurées par le test de santé globale. Les résultats sont demeurés inchangés et des apports répétés de CC à plus long terme sont recommandés.

- **Production de biomasse et retour azoté (N) :**

Les CC ont généré des biomasses importantes favorisant des apports de C labile (C_{tot} à plus de 50 % soluble) au sol ainsi que du N. Le mélange avoine-pois en dérobé de la fraisière (dispositif hâtif) a produit $3,5 \text{ t MS ha}^{-1}$ avec un retour N estimé à $84 \text{ kg N}_{\text{dispo}} \text{ ha}^{-1}$. La prairie vivace du dispositif tardif a atteint 7 t MS ha^{-1} avec un retour azoté de $148 \text{ kg N}_{\text{dispo}} \text{ ha}^{-1}$, soit six fois plus que le même mélange de prairie post-récolte semé un an plus tard dans le dispositif hâtif. La croissance et la composition botanique (plus ou moins de légumineuses) de la prairie, soumise à des conditions météorologiques différentes d'une année à l'autre, expliquent ces différences.

- **Effet sur les rendements en maïs sucré (2022) et en brocolis (2023 – dispositif tardif) :**

Seuls les traitements avec CCI trèfle et ray-grass avec précédent de prairie du dispositif tardif ont permis d'augmenter significativement les rendements en maïs sucré (en moyenne 344 g épis^{-1}) comparativement au sol nu (284 g épis^{-1}). Le taux d'épis déclassés était aussi réduit ($4,8-6,6 \%$ vs. $19,7 \%$). L'année suivante, les meilleurs rendements en brocolis ont été obtenus avec le traitement combinant prairie (2021) + trèfle intercalaire avec maïs tardif (2022) + paillis dans brocolis (2023) (604 g plant^{-1}), comparativement au sol toujours laissé à nu (540 g plant^{-1}). Le précédent de ray-grass intercalaire, quant à lui, n'a pas permis d'améliorer les rendements en brocolis, même avec paillis.

- **Répression des mauvaises herbes :**

La prairie intercalaire du dispositif hâtif a maintenu une couverture en mauvaises herbes inférieure à 5 % tout au long de la saison. Dans les brocolis (dispositif tardif), l'application de paillis a permis de réduire la couverture à moins de 3 %, contre 14-18 % sans paillis.

- **Effet du paillis sur l'humidité du sol (dernière année de la rotation) :**

Dans un sol très drainant, le paillis frais fauché-récolté a amélioré la rétention en eau du sol, surtout à 5 cm de profondeur. Même sans paillis, les antécédents de CC ont semblé contribuer à une meilleure humidité, suggérant un effet résiduel bénéfique sur la microporosité du sol par la colonisation racinaire des CC.

- **Bilan économique :**

Les stratégies de CC du dispositif tardif ont généré des gains nets allant jusqu'à $3353 \text{ \$/ha}$ sur l'ensemble de la rotation. À l'inverse, les rotations du dispositif hâtif ont montré des pertes nettes ($316-340 \text{ \$/ha}$), principalement parce que la culture principale suivant la prairie en dernière année n'a pas été incluse dans le calcul. De plus, ces résultats ne tiennent pas compte des bénéfices à moyen et long terme sur la santé des sols de l'inclusion de CC.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 MISE EN CONTEXTE

Le secteur de la production maraîchère compte environ 2 600 exploitations (36 500 ha) au Québec. L'horticulture est donc un élément important de l'économie agricole québécoise. En 2020, ses ventes atteignaient 500 M \$ avec une hausse annuelle moyenne de plus de 4 % (2017-2020) (APMQ, 2025). Il s'agit aussi du secteur de production le plus diversifié avec plus de 70 espèces cultivées. En 2020, le gouvernement du Québec s'est doté d'un *Plan d'Agriculture Durable* (PAD) (MAPAQ, 2020) qui vise à ce que 75 % des superficies cultivées soient couvertes en hiver, que 85 % des sols contiennent 4 % ou plus de matière organique (MO) et que les apports de fertilisants N soient réduits de 15 %. L'inclusion de prairies et de cultures de couverture (CC) est une pratique essentielle pour l'atteinte de ces cibles. En production maraîchère toutefois, il n'est pas simple de développer des stratégies de valorisation des CC car les productions sont très différentes les unes des autres. Ceci est d'autant plus problématique que les superficies propices à la production maraîchère sont limitées, ce qui crée une pression sur ces sols se soldant souvent par la production en série de cultures exigeantes. Les productions maraîchères sont en effet très intensives, avec des sarclages répétitifs qui détériorent la structure du sol et créent de la compaction. Elles sont aussi de grandes consommatrices d'intrants et comme elles ont une valeur élevée à l'hectare, l'utilisation massive et exclusive d'engrais chimiques est pratique courante. De ce fait, non seulement aucune MO n'est apportée, mais la déperdition de celle présente est accélérée. À long terme, de grandes quantités d'engrais sont appliquées pour combler la perte de productivité du sol. Cette compensation a toutefois ses limites et un sol en mauvaise santé finira par entraîner des pertes économiques conséquentes en ne permettant pas les rendements qu'il pourrait soutenir s'il était en bon état. Selon les estimations du chercheur David Lobb de l'Université du Manitoba, la détérioration de la santé des sols a coûté de 40 à 60 milliards de dollars entre 1971 et 2011 au Canada (Normandin, 2017).

Parmi les productions maraîchères, le maïs sucré est l'une des plus cultivées en termes de superficies au Québec, avec la laitue et la carotte, suivi des oignons, du brocoli et des choux (MAPAQ/ISQ, 2018). Son impact est donc grand en termes d'hectares touchés. Comme sa période de production est courte et que les producteurs décalent les dates de semis pour couvrir une large fenêtre d'offre, il est de pratique courante de laisser le sol à nu sans protection pour de longues périodes au printemps, suivant la fonte des neiges, ou lors des pluies abondantes d'automne (Giroux 2019, comm. pers.). La production du maïs sucré est donc très dure pour les sols. Surtout que celui-ci est le plus souvent produit avec d'autres légumes aux spécificités très variables, faisant aussi l'objet d'un étalement des dates de semis, ce qui rend très compliquée la synchronisation de la production de CC et des divers légumes, que ce soit par manque de temps, de fenêtre de production ou parce que la température et les conditions de sol ne le permettent pas (Belliard, 2019).

Les sols conventionnels de maïs sucré présentent donc souvent une capacité de recyclage des éléments nutritifs limitée, due à de pauvres propriétés biologiques et physico-chimiques du sol (Canuel Caron et Giroux, 2016). Les sols à nu sont aussi plus vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne et les quantités de sols fertiles perdus peuvent être importantes, sans compter la détérioration de la qualité des cours d'eau par la charge en sédiments qui s'y rend (M'Seffar, 2009). L'inclusion réussie de CC pourrait donc bénéficier grandement à cette production, que ce soit au niveau de la lutte contre l'érosion, les mauvaises herbes, menant à la réduction de l'emploi d'herbicides, ou à l'amélioration globale de la santé du sol (recyclage des éléments nutritifs, agrégation du sol, augmentation de la matière organique, activité microbienne) et même des rendements (Thibaudeau et Deniger, 2018).

De nombreux essais ont démontré la faisabilité et les avantages des CC semées en intercalaire (CCI) dans le maïs-grain et le maïs ensilage (Audet 2012, Laliberté 2014, Robert 2015, Vanasse et coll. 2016, Vanasse et coll. 2022). Différents clubs-conseils tels que le Réseau de Lutte Intégrée Bellechasse (RLIB) (Canuel Caron et Giroux 2016, Rochon et Giroux 2018), Pleineterre (Surdek, 2016) et Groupe Pro-Conseil (Gendron et Vezina, 2017) ont ainsi réalisé des tests d'implantation de CCI en production maraîchère. Autant avec le maïs sucré que le maïs-grain, le ray-grass (raygrass) semble être un choix de premier plan. C'est une graminée facile à planter, bon marché et qui ne compétitionne pas avec le maïs lorsque semée au stade 4-6 feuilles. S'il atteint le stade 3-4 feuilles avant que les rangs de maïs se referment, il peut supporter l'ombre et reprendre rapidement sa croissance une fois le maïs récolté (Breune et coll., 2015). Des essais à la ferme dans le maïs-grain en Montérégie sur plus de 300 ha ont confirmé l'intérêt du ray-grass comme CCI dans un mélange avec le trèfle incarnat et

le radis fourrager (Thibaudeau et Deniger, 2018). Les essais de Rochon et Giroux (2018) dans le maïs sucré ont également confirmé la bonne croissance du trèfle incarnat en intercalaire. Toutefois, dans les rotations maraîchères incluant des crucifères, le radis ne s'avère pas un ajout intéressant puisqu'il est hôte de la hernie des crucifères (Wuckash, 1990). En plus de protéger le sol de l'érosion, le ray-grass peut prélever jusqu'à 30-40 kg N résiduel ha⁻¹ à l'automne (Alvenäs et Marstorp 1993, Thomsen et Hansen 2014), diminuant d'autant les risques de perte par lessivage, ce qui protège la qualité de l'eau (Sarrantonio, 2012). Une légumineuse comme le trèfle qui fixe l'azote de l'air peut enrichir le sol en N pour la culture principale (Frankhow-Lindberg et Dahlin, 2013). L'usage des légumineuses ou des graminées comme fertilisants n'est d'ailleurs plus à démontrer et est déjà bien intégré en agriculture biologique (bio) où les engrais minéraux sont proscrits (Jobin et Douville 1996, Duval et coll. 2014). Leur utilité en maraîchage conventionnel est cependant méconnue.

Si l'on considère la rotation maraîchère dans son ensemble, des stratégies mettant à profit le décalage dans les dates de semis et la courte durée de croissance des productions pourraient être développées. Le maïs sucré hâtif laisse une fenêtre intéressante pour l'implantation d'une CCI ou d'une CC post-récolte vivace permettant la production d'une prairie de courte durée l'année suivante, incorporée avant un semis tardif de légumes. Cette technique encouragerait le retour de superficies en prairies qui ont diminué de 25 % au profit des cultures annuelles ces trente dernières années (Gélinas, 2016). Très peu de travaux sont toutefois disponibles sur l'implantation de CCI vivaces. Un projet en semis direct de maïs-grain en Montérégie rapportait que les CCI vivaces implantées au stade 4 à 6 feuilles ne produisaient pas assez de biomasse pour améliorer l'état du sol à court terme (Mathieu, 2015). Pour y remédier, un mélange combinant des graminées à croissance rapide (ex. seigle), avec des légumineuses, pourrait favoriser une meilleure croissance de la CCI avant la récolte du maïs. Par ailleurs, une croissance comparable a été obtenue avec du ray-grass vivace en comparaison d'un ray-grass annuel, tous deux cultivés en CCI d'un maïs fourrager au Québec (Breune et coll., 2015). De plus, en production maraîchère, parfois l'espace entre les rangs est plus grand qu'en grandes cultures, les conditions (lumière, espace) pourraient alors être plus avantageuses pour la croissance des espèces vivaces. Des espacements plus larges (1,5 m au lieu de 0,75 m) sont d'ailleurs actuellement à l'essai au Québec dans le maïs-grain pour favoriser la croissance des CCI (Rémillard, 2019).

Bien que de courte durée, la prairie de vivaces permettrait de faire un fauché-récolté avec la 1^{ière} coupe de juin avant sa destruction. Cette coupe pourrait être exportée comme paillis frais pour amender d'autres cultures maraîchères sur l'entreprise, par exemple dans le brocoli cultivé en plein sol (non butté et non plastifié). Cette production de courte durée et irriguée n'incite pas les producteurs à implanter des CCI (Giroux 2019, comm. pers.). Toutefois, elle bénéficierait d'un paillis d'entre-rangs puisqu'elle est très sensible au manque d'eau et à la chaleur (Loughton, 2013) et que le paillis réduit la hausse de température du sol et favorise la rétention en eau. Une étude en Chaudière-Appalaches dans le maïs-grain a démontré que l'apport de paillis frais avait bénéficié à la rétention en eau du sol pendant les canicules de juillet. Alors que les feuilles des plants sans paillis avaient commencé à s'enrouler, ce n'était pas le cas dans les parcelles avec paillis frais (Landry et coll., 2020). Ce paillis permet aussi d'apporter du C labile, seule source d'énergie des microorganismes (MOG) du sol (McGill et coll., 1986), en pleine période de pointe de minéralisation dans les sols. Sur ce point, de plus en plus d'études américaines rapportent le lien entre le C labile, l'activité biologique des sols et les rendements en maïs-grain (Culman et coll., 2013). Les CC et les rotations diversifiées accroissent aussi les contenus en C labile du sol (Culman et coll., 2013). Le C labile a cependant fait l'objet de très peu d'études au Québec. Les principaux travaux sont ceux de C. Landry qui ont aussi fait le lien entre le C labile, l'activité des MOG et le NO₃ disponible du sol en grandes cultures (Landry et coll. 2011, Landry et coll. 2017, Landry et coll. 2023) et lors d'un projet dans la fraise à jours neutres (Landry et Boivin, 2012).

Par ailleurs, le paillis permet aussi dans une certaine mesure de réduire la compaction du sol (FAO, 2019). Un paillis lignifié d'au moins 10 cm est toutefois nécessaire pour compétitionner les mauvaises herbes (Weill et Duval, 2009). Fauché en courts brins (3-4 cm) et légèrement incorporé lors des sarclages, le paillis frais est un excellent fertilisant. En agriculture bio en Europe, la pratique est en pleine expansion pour s'affranchir des engrais de ferme (Frund, 2015). Sous nos conditions, la ferme bio Agri-Fusion a testé cette option en 2014 en apportant de la biomasse de trèfle en post-levée du maïs-grain. Ceux-ci ont ainsi estimé qu'un hectare de trèfle avait fourni environ 100 kg de N dans une 1^{ière} coupe (Desperrier Roux, 2014). Des observations préliminaires réalisées en Chaudière-Appalaches (Landry et coll., 2020) ont également permis de valider que 1,3 ha de prairie de légumineuses pouvait fournir un équivalent de 100 kg N disponible ha⁻¹ pour le maïs-grain. Toutes considérées, des stratégies permettant de produire localement une source ponctuelle de paillis sans avoir à mobiliser une parcelle de terrain toute une saison apparaissent donc avantageuses. Si la CC vivace est implantée en post-récolte du maïs,

il est même envisageable que les tiges vertes du maïs sucré soient une excellente source de MO fraîche et C labile, fauchée et incorporée dès la récolte du maïs. Dans un système bio, des gains de 500 à 900 kg ha⁻¹ de grains dans le soya ont été observés quand celui-ci suivait un maïs sucré avec incorporation des cannes vertes (Agri-Fusion, 2018, comm. pers.). Dans le cas du maïs sucré tardif, pouvant être semé aussi tard que le 24 juin, une prairie de courte durée peut être implantée en août de l'année précédente après la récolte d'un légume hâtif. Le maïs sucré tardif peut aussi permettre la production de CCI annuelles enfouies au printemps suivant quand le sol est ressuyé avant la production d'un légume de fin mai.

En conclusion, ce projet vise à démontrer la faisabilité et les avantages d'inclure les pratiques de CC susmentionnées (CC, CCI, paillis frais) dans des rotations en maraîchage diversifié sous régie conventionnelle, incluant du maïs hâtif ou tardif, pour inciter les producteurs à adopter au moins l'une des CC proposées. Le choix de mesurer des indicateurs de santé des sols reconnus, telle l'analyse de santé des sols du Cornell Institute (Moebius-Clune et coll., 2016), devrait renforcer cet incitatif. En effet, les tests de santé des sols maintenant offerts au Québec (adaptés pour utiliser le Mehlich-3 (M3)) permettent de donner une note globale de santé du sol. Cette mesure permet au producteur de quantifier concrètement l'amélioration de ses sols, ce qui le motive à implanter des pratiques de conservation, au-delà des seuls rendements obtenus.

2.2 OBJECTIFS

L'objectif global est de démontrer la faisabilité d'implanter diverses CC dans une production maraîchère conventionnelle et de mesurer leur potentiel à hausser la santé et la productivité des sols pour réduire les risques de dégradation. Plus spécifiquement, il vise à démontrer l'impact des CC en comparaison de la pratique usuelle avec sol à nu sur :

- 1) la santé globale du sol et sa résistance aux facteurs de dégradation;
- 2) les rendements de la culture principale (maïs sucré et brocoli);
- 3) les risques de pollution diffuse par le nitrate résiduel;
- 4) les coûts nets de l'implantation des CC.

Et l'impact du choix des différentes pratiques d'implantation de CC sur :

- 5) la croissance et la composition de la CC et
- 6) l'occurrence des mauvaises herbes.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 SITE ET TRAITEMENTS

3.1.1 Description du site

L'étude s'est déroulée en contexte commercial de production à la Ferme Mireille et Clément Gosselin, producteurs maraîchers, située à Saint-Nicolas dans la région de Chaudière-Appalaches, en sol de texture loam sableux schisteux de la série Saint-Nicolas, de l'automne 2021 à l'automne 2023. Deux dispositifs indépendants implantés côte à côte ont permis de tester des traitements pertinents pour une rotation de trois ans qui inclut une année de maïs sucré hâtif ou tardif. L'objectif du projet n'était pas de comparer les rotations avec maïs hâtif à celles avec maïs tardif, ce qui explique que les dispositifs étaient distincts. Il s'agissait plutôt de trouver des rotations qui fonctionnent et qui sont bénéfiques pour le maïs hâtif ou tardif, car les producteurs décalent leur semis afin de couvrir une large plage temporelle d'offre. L'avantage d'avoir les deux dispositifs a permis également de tester si les CC de la rotation hâtive pouvaient servir de source de paillis frais fauché-récolté pour la rotation avec du maïs tardif. Enfin, l'étude a été élaborée de façon à maximiser chaque fenêtre potentielle de mise en valeur des CC, intercalaires ou fauchées. Chacun des dispositifs incluait également une rotation témoin très répandue, sans culture de couverture (CC) (Denis Giroux 2019, comm. pers.), laissant le sol nu. Une attention particulière a été portée pour ne pas ajouter de travail de sol dans les rotations avec CC vs. avec sol nu. De plus, comme l'accroissement de la fertilité du sol, surtout pour le cycle du N, est un des principaux effets d'une meilleure santé du sol, une fertilisation sous-optimale (85 % de la dose recommandée dans le *Plan agroenvironnemental de fertilisation* (PAEF) du producteur) en N a été apportée au maïs et au brocoli pour pouvoir mesurer cet effet éventuel et atteindre les objectifs du PAD (réduction des fertilisants N de 15 %). Les doses de P et K ont quant à elles été apportées à 100 % de la dose recommandée. Les fertilisations pour une même culture étaient donc équivalentes entre les traitements.

3.1.2 Séquence des rotations et traitements

Tel que mentionné précédemment, deux rotations distinctes ont été élaborées pour favoriser une couverture de sol constante avec, d'une part, la production de maïs sucré hâtif (dispositif hâtif) et, d'autre part, la production de maïs sucré tardif (dispositif tardif) afin de comparer ces pratiques avec une rotation plus conventionnelle sans CC (sol nu). Le Tableau 1 résume les deux rotations et le calendrier des principales opérations. Le Tableau 2 présente les taux de semis pour chacune des CC intégrées dans les rotations des dispositifs hâtif et tardif. Pour le dispositif hâtif, suivant une récolte de fruits hâtifs (fraise d'été), une CC annuelle d'un mélange avoine + pois fourrager a été semée dans les deux traitements avec CC (i.e. Prairie inter et Prairie post) (4 août 2021) puisque ce mélange est reconnu pour sa productivité en automne grâce à sa résistance au froid et sa vitesse de croissance (Weill et Lafrance, 2016). Une CC annuelle a été choisie puisqu'elle était suivie par du maïs hâtif implanté tôt au début de la saison 2022 (6 mai), la survie de la CC n'était donc pas recherchée au printemps. Les résidus de la CC ont donc été incorporés au printemps (5 mai), juste avant les semis (6 mai) de maïs sucré hâtif (var. Sweetness). La fertilisation du maïs consistait en des apports de 92 kg N ha⁻¹ (45 kg N ha⁻¹ aux semis et 47 kg N ha⁻¹ au fractionnement), 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et 30 kg ha⁻¹ de K₂O. Par la suite, deux modes d'implantation de CC vivaces ont été comparés, soit en intercalaire du maïs (Prairie inter) (semée au stade 4-6 feuilles (29 juin)) ou en post-récolte (Prairie post) (25 août). L'objectif était ainsi de voir l'effet du mode de production pour un même mélange de CC vivace (i.e. prairie), sur la composition et la biomasse de la 1^{ère} coupe de cette prairie l'année suivante (13 juin 2023). La CC vivace était un mélange de prairie dite de « courte durée » composée de graminées et légumineuses vivaces (seigle d'automne, festulolium, mélilot et trèfle rouge) (Tableau 2). Il s'agissait également d'un mélange recommandé pour des semis en août pour l'implantation de la CC vivace en post-récolte (Weill, 2019). En 2023, l'essai s'est terminé avec la 1^{ère} coupe des prairies (13 juin) dont la biomasse a été exportée comme paillis frais dans les sous-parcelles du dispositif tardif en culture de brocolis.

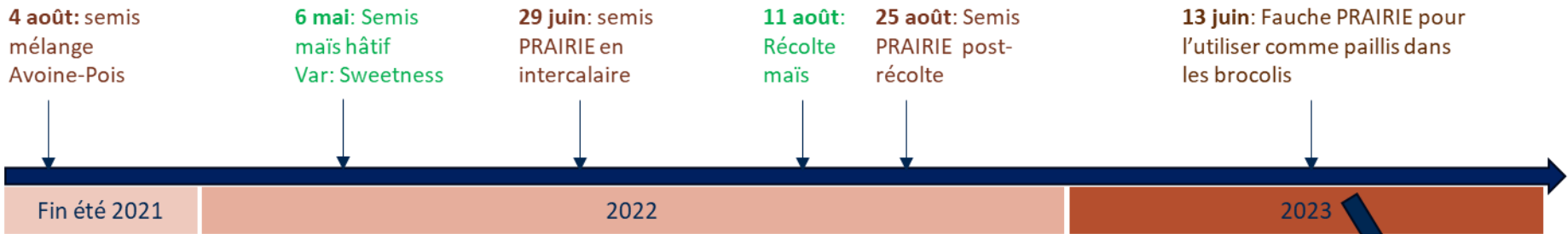
Dans le dispositif tardif, suivant la récolte de fruits hâtifs (fraise d'été), une CC vivace a été semée (4 août 2021) puisque le semis tardif du maïs en 2022 laissait une grande fenêtre de croissance en début de saison. Le mélange de CC vivaces utilisé était le même que celui du dispositif hâtif (i.e. prairie). La CC a été laissée jusqu'en juin 2022 puis a été incorporée deux semaines avant les semis de maïs sucré tardif (var. Temptress) (21 juin). La fertilisation du maïs tardif est plus élevée que

celle du maïs hâtif car la culture a une croissance plus rapide et importante et elle consistait en 100 kg N ha⁻¹ (45 kg N ha⁻¹ aux semis et 55 kg N ha⁻¹ au fractionnement), 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et 30 kg ha⁻¹ de K₂O. Après le fractionnement, au stade 4-6 feuilles, deux CC intercalaires (CCI) annuelles ont ensuite été comparées, soit le trèfle incarnat (Trèfle inter) et le ray-grass annuel non-alternatif (Raygrass inter). Les résidus de CCI ont été incorporés au printemps 2023 (≈10 mai), avant l'implantation d'une culture de brocolis (var. Eastern Crown) (plein sol, sans plastique et irriguée selon la méthode usuelle du producteur) (18 mai). La fertilisation du brocoli consistait en 122 kg N ha⁻¹ (70 kg N ha⁻¹ à la plantation et 52 kg N ha⁻¹ trois semaines plus tard), 21 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 45 kg K₂O ha⁻¹. Au 2^{ième} sarclage du brocoli (dernière application d'engrais (13 juin)), les traitements ayant reçu des CCI en 2022 (Trèfle inter et Raygrass inter) ont été divisés en deux sous-parcelles, dont une a reçu du paillis frais importé du dispositif hâtif et l'autre est demeurée sans paillis. Le traitement témoin sans CC (sol nu) quant à lui n'a pas été divisé, car il n'a pas reçu de paillis. L'étude de la rotation s'est terminée après la récolte des brocolis (17 juillet). Les Figure 1 et Figure 2 résument en schéma et en images les principales étapes de production des cultures testées dans les deux rotations.

Tableau 1. Séquence des rotations et dates des principales opérations culturales pendant les trois années de l'étude.

Opérations et échantillonnages	Traitements de cultures de couverture (CC)					
	Dispositif avec maïs sucré hâtif			Dispositif avec maïs sucré tardif		
	Sol nu	Prairie inter	Prairie post	Sol nu	Trèfle inter	Raygrass inter
2021						
Destruction de la fraisière et travail de sol	17-18 juillet			17-18 juillet		
Évaluation du sol par pédons complets	21 juillet			21 juillet		
Caractérisation du sol avant semis des CC	4 août			4 août		
Semis des CC	Sol nu	4 août Mélange avoine-pois	4 août Mélange avoine-pois	Sol nu	4 août Mélange vivace (prairie)	4 août Mélange vivace (prairie)
Mesure de la biomasse des CC et du recouvrement en CC ou mauvaises herbes (MH)	15 octobre			15 octobre		
Mesure du nitrate résiduel du sol	15 octobre			15 octobre		
2022						
Incorporation des résidus de CC	5 mai			.		
Échantillonnage de sol	6 mai			.		
Mesure de la biomasse de la CC prairie, fauche et travail de sol	.			7 juin		
Semis du maïs sucré	6 mai			21 juin		
Échantillonnage de sol	23 juin			25 juin		
Semis de la Prairie intercalaire du maïs	.	29 juin Mélange prairie	.	.		
Échantillonnage de sol et semis CC intercalaires annuelles du maïs	.	.	.	Sol nu	15 juillet Trèfle incarnat	15 juillet Ray- grass
Récolte du maïs sucré	11 août			8 septembre		
Échantillonnage des cannes de maïs et fauche des cannes	19 août			12 septembre		
Travail de sol et semis de la Prairie post-récolte	Résidus maïs aucun travail	Fauche des cannes et aucun travail	25 août Mélange prairie	.		
Échantillonnage de sols, recouvrement des CC et MH et mesure des biomasses des CC	17 octobre			17 octobre		
2023						
Évaluation de la reprise des Prairies et incorporation des résidus de CCI	.	9 mai	9 mai	10 mai		
Échantillonnage de sol et plantation des brocolis	.			18 mai		
Fauche de la biomasse de la prairie et application du paillis dans les entre-rangs de brocolis	.	13 juin	13 juin	.	13 juin	13 juin
Échantillonnage de sol 2 semaines post-paillis	.			27 juin		
Récolte des brocolis	.			17 juillet		
Échantillonnage de sol (santé globale, physico-chimie et pédon)	3-17 juillet			17 juillet – 1 août		

Rotation Maïs sucré hâtif



Rotation Maïs sucré tardif



Figure 1. Schéma des dates importantes d'implantations et de récoltes des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.

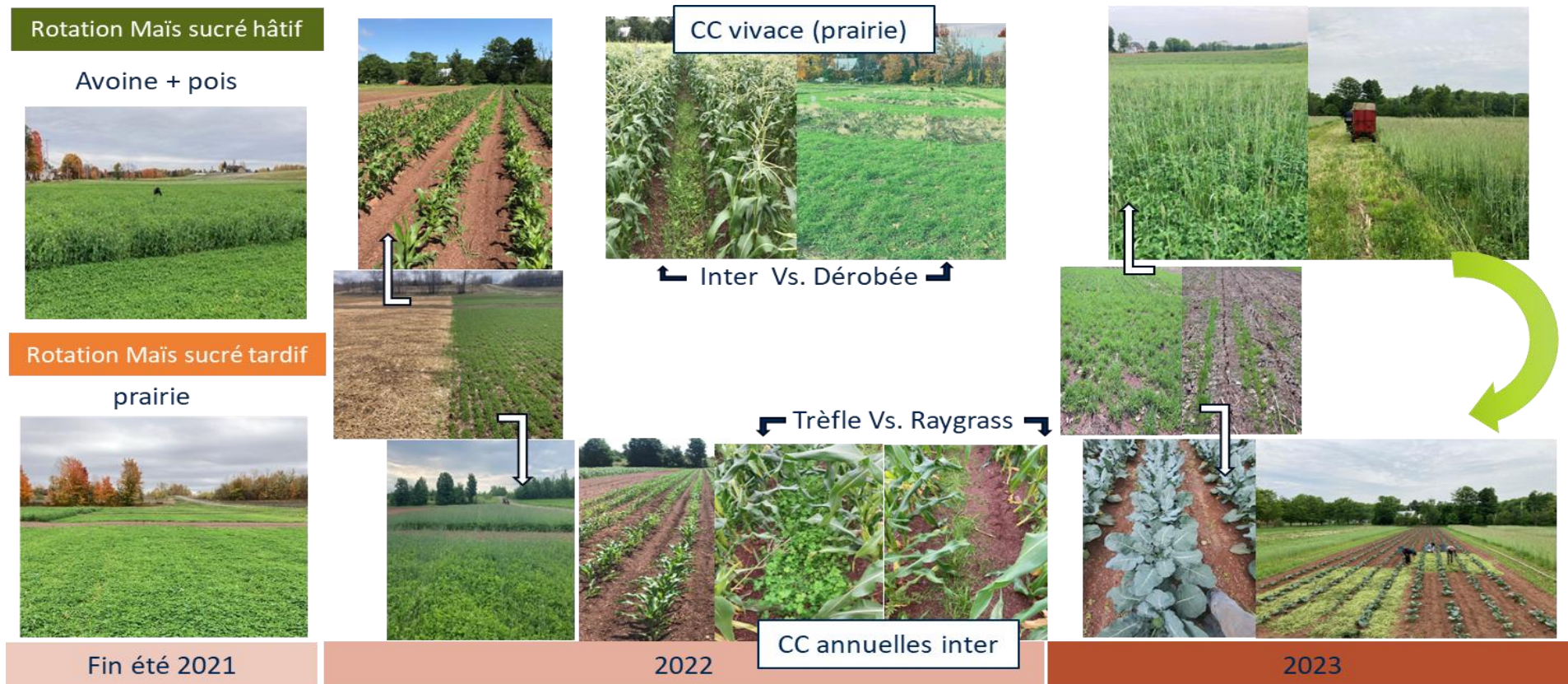


Figure 2. Résumé en images des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.

Tableau 2. Variétés et taux de semis des cultures de couverture intégrées dans les rotations des dispositifs avec maïs sucré hâtif et avec maïs sucré tardif, de 2021 à 2023.

Culture de couverture	Espèces	Taux de semis (kg ha ⁻¹)
Mélange Avoine et pois	Avoine ordinaire	80
	Pois fourrager 40-10	100
Prairie vivace	Seigle d'automne ordinaire	80
	Festulolium Sugar Crest	10
	Trèfle rouge 2 coupes	12
	Mélilot ordinaire	8
Trèfle incarnat intercalaire	Trèfle incarnat ordinaire	25
Ray-grass intercalaire	Ray-grass fourrager annuel ordinaire	30

3.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Chacun des dispositifs était un plan en blocs complets aléatoires de trois traitements avec ou sans CC. Les parcelles mesuraient 7 m de long par 8 m de large (8 rangs). Le producteur implantait toujours ses rangs à 1 m de distance (sans butte), car il produit une grande variété de légumes et fruits avec sa machinerie. Pour le dispositif tardif, lors de la 3^{ième} année (année brocoli), les parcelles principales ont été divisées en sous-parcelles de 7 m de long par 4 rangs de large (4 m). Les traitements ont été répartis au hasard dans un plan en blocs complets aléatoires lors de l'année 2021 et 2022 et lors de l'année 2023, les parcelles avec CC (années 2021 et 2022) ont été divisées en deux et ont reçu ou non du paillis fauché-récolté selon un ordre aléatoire (Figure 3). Un modèle linéaire mixte a été ajusté aux données à l'aide de la procédure PROC MIXED de SAS pour effectuer l'analyse de variance des variables à l'étude. Cette procédure a permis des ajustements pour pallier le fait qu'il y a un déséquilibre dans la structure des données puisque les parcelles témoins sans CC n'ont pas été subdivisées la 3^{ième} année. Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Les analyses de variance ont été réalisées pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll., 2006).

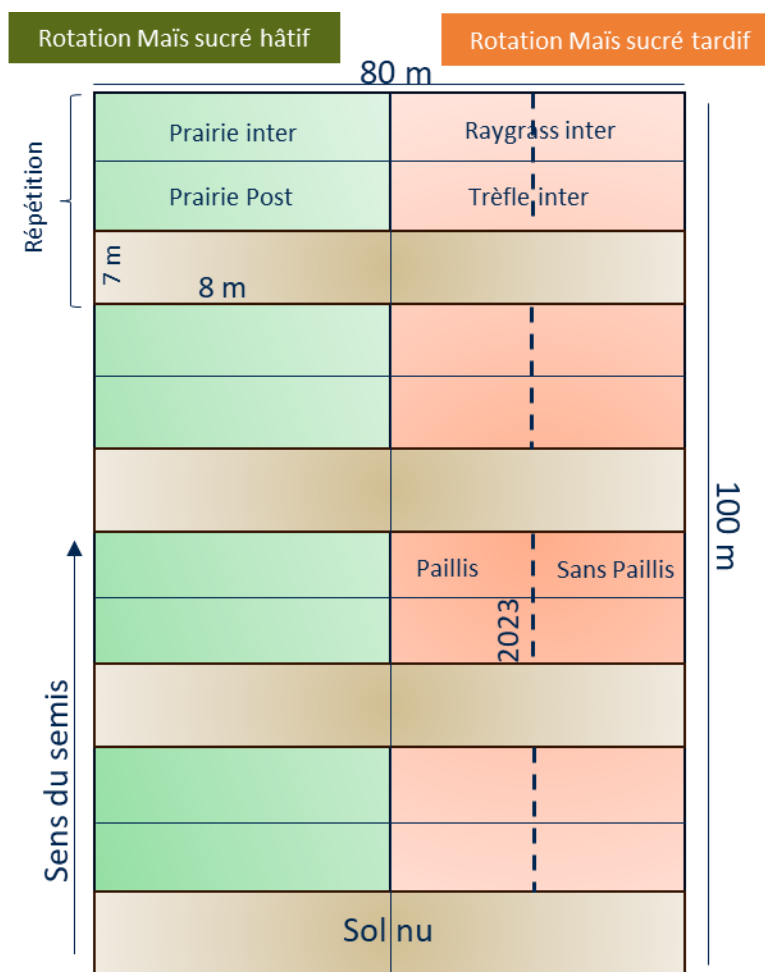


Figure 3 : Schéma des dispositifs des différentes cultures de la rotation avec maïs sucré hâtif et de celle avec maïs sucré tardif, pour 2021 à 2023. Note : Visuel simplifié. Sur le terrain, les traitements ont été randomisés dans les blocs (répétition).

3.3 COLLECTE DES DONNÉES ET ANALYSES DE LABORATOIRE

3.3.1 Analyse pédologique des sols

Préalablement à l'implantation des dispositifs expérimentaux, deux profils pédologiques ont été réalisés en 2021 avant la destruction de la fraisière. Les profils de sol ont été faits sur le rang de fraise (butte). Les résultats de ces profils ont servi à connaître le contexte pédologique du site en plus d'être un comparatif pour évaluer l'impact des traitements sur la santé structurale des sols en fin de rotation. À cet effet, à la fin de l'étude en 2023, 22 profils « partiels » supplémentaires ont été réalisés. Pour le dispositif hâtif, un profil a été fait pour chacune des 4 répétitions de chacun des traitements (Sol nu, Prairie inter et Prairie post) pour un total de 12 profils. Pour le dispositif tardif (Sol nu, Trèfle inter, Raygrass inter), des profils ont été réalisés pour deux répétitions puisque lors de la dernière saison (2023), les parcelles de CC plantées en brocoli ont été subdivisées en deux sous-traitements (avec ou sans paillis). Il y avait donc 5 traitements par répétition pour un total de 10 profils. La qualité structurale des sols a été évaluée à l'aide de l'indicateur de la qualité physique des sols minéraux (IQPSM). L'IQPSM est un outil visuel développé par l'IRDA (2020-2023) sous l'avis d'un groupe d'experts composé de conseillers et de pédologues. À l'aide de cinq descripteurs pedomorphologiques (type, classe et grade de la structure, consistance, porosité fine et grossière), une note quantitative est donnée à la structure de chacun des horizons identifiés dans le profil de sol en fonction de la classe texturale. Par la suite, un niveau de qualité (mauvais, modéré, bon, très bon) est donné à la structure. La localisation des profils de sol qui ont été évalués est présentée à la Figure 4.



Figure 4. Localisation des profils de sols réalisés en 2021 (rouge) et en 2023 (bleu).

3.3.2 Caractérisation physico-chimique des sols

3.3.2.1 Caractérisation de la santé globale en début et fin de projet

En 2021, avant l'ajout des traitements, une analyse globale de santé des sols (une par répétition (bloc)) a été réalisée et cette même analyse a été répétée en fin de projet (2023), dans chacune des parcelles des blocs 1 à 3. La profondeur d'échantillonnage était de 0-20 cm. Afin de favoriser le transfert et l'applicabilité des résultats, la santé des sols a été évaluée selon une méthode offerte par les laboratoires commerciaux (dans cette étude AgroEnviroLab (AEL)). L'analyse globale comprend une série détaillée d'indicateurs, intégrée dans une note globale de santé des sols. Le producteur peut ainsi voir évoluer concrètement sa note pour chacun de ses champs. La méthode de santé globale d'AEL est adaptée de la méthode de Cornell (Moebius-Clune et coll. 2016, Gauthier et Champagne 2017). Pour ce faire, la stabilité des agrégats a été évaluée au moyen d'un simulateur de pluie (Cornell Soil Health Lab, Ithaca, NY, USA) faisant tomber des gouttes sur un tamis contenant un poids connu d'agrégats d'un sol afin de déterminer le pourcentage d'agrégats entre 0,25 mm et 2 mm qui restent intacts, lorsque soumis à cette forte pluie. La proportion des agrégats a été déterminée en séparant les grains de sable grossiers et les débris organiques afin d'obtenir le poids des agrégats (0,25 mm à 2,0 mm) d'un sol. Le pH d'une suspension d'une partie d'eau pour une partie de sol (10 cm³ de sol/10 ml d'eau) a été mesuré avec une sonde à électrode de verre (Mettler Toledo, Seven compact, VWR, Mississauga, ON, CA). Les éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, B et Fe) ont été extraits par la méthode Mehlich 3 (M3) et dosés par spectrophotométrie d'émission au plasma (Agilent 725-ES ICP OES, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). La matière organique (MO) a été mesurée par la masse perdue lors de l'incinération du sol dans un four à moufle (Thermolyne F30400, Thermo Fisher Scientific, Asheville, NC, USA) pendant un minimum de 12 heures et est présentée en pourcentage de la masse totale du sol. Le carbone actif (C_{actif}), également appelé carbone oxydable au permanganate, qui est une fraction de la MO agissant comme source immédiate de nourriture

et d'énergie pour les microorganismes du sol, a été quantifié en utilisant 20 ml de permanganate de potassium 0,02 M (KMnO_4) réagissant avec 2,5 g de sol séché. L'oxydation du carbone développe alors une couleur violette dont l'intensité est mesurée par spectrophotométrie (colorimètre Pocket II, HACH, Loveland, CO, USA) à 550 nm. L'interprétation des données a été faite par une courbe d'étalonnage calculée selon l'équation de Weil et coll. (2003). Une analyse de respiration en incubation à température contrôlée a été réalisée, soit une incubation de quatre jours durant laquelle le dégagement de CO_2 est mesuré après la réhumidification du sol séché. Au début du processus d'incubation, une éprouvette contenant 10 ml d'une solution de NaOH 1N est placée dans le contenant avec le sol. La solution capte le CO_2 dégagé par la respiration microbienne sous forme de Na_2CO_3 . La consommation de NaOH est ensuite déterminée par titrage acidimétrique à l'aide d'une solution de HCl 1N permettant ainsi de déterminer la quantité de CO_2 dégagée par les microorganismes pendant l'incubation. Enfin, l'azote labile a été mesuré par l'extraction de l'azote ammoniacal N-NH_3 à l'aide d'une solution basique et fixation dans un gel coloré sur une sonde de la technologie SOLVITA®. La sonde a alors été insérée dans un colorimètre et le niveau d'absorbance était associé à une concentration de N-NH_3 .

En complément des analyses physico-chimiques et biologiques réalisées par AEL, au même moment, des analyses complémentaires ont été réalisées au Laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA pour toutes les répétitions. Ainsi, l'activité biologique du sol a aussi été quantifiée par le potentiel de minéralisation du N organique. Pour ce faire, une incubation en conditions aérobiques a été réalisée sur sol humide à température ambiante pendant dix jours afin de mesurer le pouvoir de minéralisation du N organique (production de N-NO_3 et N-NH_4) (Fox et Piekielek 1978, Juma et coll. 1984). Les contenus en N_{min} (N-NO_3 et N-NH_4) au temps zéro et à la fin de l'incubation ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon) (CPVQ, 1993). Enfin, le C organique soluble (C_{eau}) a été déterminé conformément à la méthode proposée par Garcia et coll. (1990), où 3 grammes de sol sec sont placés dans un vial contenant 30 ml d'eau et agités pendant 2h. La suspension est par la suite centrifugée à 5000 g. Le C_{eau} est mesuré sur une partie aliquote de l'extrait à laquelle on a ajouté du HCl et fait barboter afin de libérer le C inorganique.

3.3.2.2 Caractérisation annuelle

Pour chaque dispositif, avant les semis de maïs et/ou de brocolis, une caractérisation physico-chimique des sols a été réalisée par parcelle et comprenait le pH, la MO et les éléments M3. Juste avant le fractionnement de l'engrais au stade 4-6 feuilles du maïs, le N-NO_3 a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie automatisée SEAL (Technicon). Au stade soies du maïs (hâtif ou tardif), une caractérisation de l'activité biologique des sols a été réalisée et comprenait le pouvoir de minéralisation du N organique (N_{org}) pendant dix jours et le C_{eau} . Enfin, deux semaines après l'application du paillis fauché-récolté dans le brocoli, le contenu en N-NO_3 du sol a été dosé dans toutes les parcelles et sous-parcelles du dispositif tardif. À chaque automne également, le N-NO_3 a été dosé sur la strate 0-30 cm afin de mesurer la quantité de nitrate résiduel encore présent.

3.3.3 Caractérisation des biomasses et évaluation des rendements

3.3.3.1 Cultures de couverture et paillis fauché-récolté

Le couvert de chaque CC a été évalué à l'intérieur de deux quadrats de 50 cm x 50 cm par parcelle, incluant les parcelles sol nu. Le recouvrement évaluaient l'occurrence des CC et également des mauvaises herbes (MH). Cette évaluation a eu lieu chaque automne (2021 et 2022) et avant l'incorporation des CC (2021 à 2023) et correspondait à la mesure de la biomasse sèche de toutes les CC (2021 à 2023). Les biomasses végétales de CC (prairies, CC annuelles, paillis fauché-récolté) ont été caractérisées pour leur contenu en C et N et leur résistance à la dégradation. Pour les CC annuelles (avoine + pois), cela a été réalisé à l'automne 2021 (dispo hâtif) et en 2022 (dispo tardif, Trèfle inter et Raygrass inter) puisqu'elles périssent pendant l'hiver. Pour les prairies, l'analyse a été réalisée au moment de les incorporer (2022 (dispo tardif)) ou de les faucher pour exportation (2023 (dispo hâtif)). Pour ce faire, toute la biomasse de CC présente dans les 2 quadrats a été combinée et séchée à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche, puis broyée à 100 mesh pour doser les contenus en éléments totaux (C_{total}

et N_{total}) par combustion LECO. De plus, l'indice de stabilité biologique (ISB) de cette biomasse, qui permet de rendre compte de la résistance d'une matière organique à la dégradation par les microorganismes du sol, a été mesuré selon la méthode originale AFNOR (AFNOR, 2009) utilisant un digesteur de fibres (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology. Dû à son coût élevé, l'ISB était réalisé sur un composite des 4 répétitions par traitement. Également, pendant la saison en maïs, les recouvrements en CC intercalaire (CCI) (Trèfle inter et Raygrass inter) et en MH ont été comparés visuellement (quadrats) dans toutes les parcelles au stade soies et à la récolte du maïs. Enfin, l'année maïs, le pourcentage de MH a été aussi déterminé à l'automne. En 2022, quelques jours après la récolte du maïs, dans chaque dispositif (hâtif : 19 août et tardif : 12 septembre), trois cannes de maïs consécutives de la zone de rendement ont également été récoltées à l'aide de faucilles et pesées. Les cannes ont été séchées à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche et broyées à 100 mesh pour doser les contenus en éléments totaux (C_{total} et N_{total}) par combustion LECO ainsi que les contenus en P et K (acide nitrique) et pour caractériser leur ISB. Le but de cette analyse était entre autres d'estimer les contenus en N potentiellement disponibles à la culture suivante, à partir des cannes de maïs fauchées au sol en saison ou incorporées dans le cas du traitement avec Prairie post.

Les prélèvements des CC et des cannes ont été calculés en multipliant la masse sèche (MS) par le contenu total en élément, selon la formule suivante (ex. N_{total} des cannes) :

$$\text{Prélèvements } N_{\text{total}} \text{ (cannes)} \text{ (Kg N ha}^{-1}\text{)} = \text{MS cannes (kg ha}^{-1}\text{)} * N_{\text{total}} \text{ cannes (\%)}$$

En 2023, la biomasse de la 1^{ière} coupe des traitements de prairie (Prairie inter et Prairie post) du dispositif hâtif a été fauchée avec une mini-fourragère et déplacée manuellement dans les entre-rangs des sous-parcelles du dispositif tardif en brocoli qui recevaient ce traitement. Une biomasse humide équivalente à 19 kg a été étendue entre les rangs de brocolis (1 entre-rang x 7 m de long) du sous-traitement avec paillis.

De plus, au moment de l'ajout du paillis (13 juin) et pour tout le reste de la croissance des brocolis, la teneur en eau volumique a été suivie au moyen de sondes TDR (Time Domain Reflectometry) de modèle CS625 et d'un enregistreur de données CR300 (Campbell Scientific). Les TDR étaient installées dans trois traitements des répétitions 2 et 3 soit Sol nu, Raygrass inter + paillis et Raygrass inter sans paillis. Les sondes étaient positionnées dans l'entre-rang, à l'horizontale, à 30 cm des plants, dans le même sens et à 5 et 15 cm de profondeur, du côté le plus chaud de la butte. Le paillis étant disposé dans l'entre-rang, la position des TDR était prévue pour mesurer l'effet du paillis plus que l'effet du plant.

3.3.3.1.1 Méthode d'estimation de la fourniture en N des cultures de couverture pour la culture subséquente

Afin d'estimer les contributions en N provenant des CC, les étapes principales suivantes ont été suivies : 1) mesurer la biomasse sèche aérienne, 2) déterminer sa concentration en N (racines exclues) et 3) choisir un coefficient de minéralisation du N (Vanasse et coll., 2022). Le choix du coefficient de minéralisation a été fait selon la publication de Jobin et Douville (1996) qui propose un coefficient de 20 à 90 % en fonction du contenu en N total de la biomasse aérienne de la CC. Cette méthode a été privilégiée pour faire le lien avec les travaux antérieurs de l'équipe sur les CC (Landry et coll. 2019, 2020, 2024a) qui réfèrent à cette méthode. Ainsi, un coefficient de 20 % a été appliqué à un contenu en N de 1 % et un coefficient de 90 % à un contenu de 4,5 %. À noter néanmoins que les valeurs des coefficients de minéralisation des CC font toujours l'objet de recherches et dans une publication plus récente au Québec, soit le Guide des cultures de couverture en grandes cultures, Vanasse et coll. (2022) proposent quant à eux l'emploi de coefficients de minéralisation développés en Oregon. Ces coefficients proviennent de régressions calculées avec les résultats de différentes CC incubées dans des sols de différentes textures en conditions contrôlées (Sullivan et coll., 2020). Ces coefficients sont plus conservateurs que Jobin et Douville (1996) et ne dépassent pas 50 % même avec un contenu en N de la biomasse aérienne de 4 %.

3.3.3.2 Rendements en maïs sucré et en brocolis

Les rendements du maïs sucré ont été évalués en 2022 pour chaque dispositif (hâtif : 11 août et tardif : 8 septembre) en grammes (g) épis⁻¹. Pour ce faire, une zone centrale de deux rangs de 4 m linéaires par parcelle a été récoltée manuellement.

Tous les épis à l'intérieur de la zone ont été récoltés (1 épi plant⁻¹) et classés. Le classement consistait en la mesure de la longueur de chaque épi. Par la suite, les épis jugés trop petits en longueur ou en largeur pour les standards du producteur ont été déclassés, les autres ayant été jugés vendables. Le taux de déclassé a donc été déterminé (nb. d'épis déclassés/nb. d'épis totaux récoltés * 100). Parmi les épis vendables, 6 épis ont été conservés au hasard. Ils ont été épluchés pour juger de façon qualitative les grains (remplissage, alignement, grosseur et uniformité de la maturité). En 2023, les rendements (biomasse) des brocolis dans le dispositif tardif (17 juillet) ont été évalués (g brocolis⁻¹) en prélevant 14 têtes dans la zone centrale de deux rangs de 4 m linéaire dans chaque parcelle et sous-parcelle (avec ou sans paillis). Tous les brocolis récoltés correspondaient à des brocolis matures de calibre considéré comme vendable par le producteur. Chaque tête a été pesée individuellement et classée en trois catégories en fonction du diamètre (catégorie 1 : plus de 13 cm, catégorie 2 : 6,35 à 13 cm et catégorie 3 : moins de 6,35 cm). Les plants affectés par la cécidomyie, les plants borgnes (sans tête) ou très petits n'ont pas été sélectionnés pour l'évaluation car ceux-ci étaient rares dans le champ et visiblement non liés à l'effet du traitement.

3.4 COÛTS ET BÉNÉFICES

Une analyse économique sommaire a été réalisée pour chacune des rotations de l'étude. Elle se concentrait à détailler les coûts et les bénéfices associés aux différentes rotations afin d'obtenir les coûts nets de l'implantation des pratiques de CC. Pour chacune des rotations, toute chose étant égale par ailleurs, seul ce qui se rapportait aux CC et au travail de sol associé à leur implantation et/ou au travail de sol évité par leur présence (semis, implantation, travail de sol) a été considéré. L'analyse est donc sommaire, dans le sens où cette dernière ne présente pas l'ensemble des opérations de culture effectuées sur la ferme, mais seulement celles liées à la stratégie d'implantation des CC et à la réduction du travail du sol. Ainsi, les opérations qui étaient communes aux différentes rotations (ex. coûts de semence ou des transplants de la culture principale) n'ont pas été prises en compte dans le calcul. Enfin, les coûts des différentes stratégies d'inclusion de CC ont été comparés aux rendements obtenus selon les rotations.

Le coût des semences de CC. Le provient de l'AGDEX 100.45/855 (2024) – *Semences de grandes cultures- Prix 2024* dont le prix moyen de 2023 a été retenu. Les taux de semis des CC sont ceux utilisés par le producteur directement sur la ferme. Le coût pour l'implantation des CC provient de l'AGDEX 537/821b (2016) – *Engrais verts semés à la dérobée et en intercalaire*. Pour les prairies, les coûts proviennent aussi de l'AGDEX 121/821b (2024) – *Foin – Production commerciale*. Les coûts de travail de sol proviennent de l'AGDEX 740/825 (2022) – *Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés*. Enfin pour les revenus des cultures, les valeurs proviennent des AGDEX 253/821a (2025) – *Maïs sucré* et AGDEX 252.19/821 (2017) – *Brocoli biologique*. L'évaluation démarre lors de l'implantation du projet en automne 2021, après la culture principale précédant les semis de CC en dérobé et se termine en 2023, après la fauche de la prairie dans le dispositif hâtif et après la récolte des brocolis dans le dispositif tardif.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

La Figure 5 illustre les données météorologiques (températures et précipitations) enregistrées durant la saison 2022 dans la localité de l'essai. Le début du mois de mai a été marqué par des conditions chaudes et sèches. Entre le 9 et le 16 mai, les températures étaient en moyenne supérieures de 5,4 °C à la normale, dans le sud de la province (+4,7 °C à l'échelle du Québec) (MELCCFP, 2022). En revanche, la seconde moitié du mois a connu un refroidissement. Du 22 au 24 mai, les températures étaient en moyenne inférieures de 1,7 °C à la normale dans le sud (-1,1 °C au Québec). En juin, les températures se sont rapprochées des normales saisonnières.

En ce qui concerne les précipitations, les journées sans pluie ont été rares, à l'exception du début mai et de la fin juin. Les pluies fréquentes ont compliqué les traitements phytosanitaires et les travaux post-levée, favorisant la prolifération des mauvaises herbes, des maladies et des insectes (FADQ, 2022). Les mois de juillet, août et septembre ont été généralement plus chauds que la normale, avec des précipitations conformes aux moyennes saisonnières (MELCCFP, 2022).

La Figure 6 présente les données météorologiques de la saison 2023. Les mois d'avril et mai ont été légèrement plus chauds que la normale. Juin et juillet ont été à la fois chauds et secs, avec des températures supérieures à la normale (+2,7 °C en juillet). Ce dernier mois a également été exceptionnellement humide, battant le record régional de précipitations pour juillet (270 mm contre 236 mm en 1976).

En août, les températures se sont rapprochées des normales, bien qu'elles soient restées légèrement plus élevées (+1 °C), tandis que les précipitations sont demeurées abondantes (238 mm en Chaudière-Appalaches) (MELCCFP, 2023). Selon la FADQ (2023), ces précipitations excessives ont eu un impact négatif sur la quantité et la qualité des récoltes dans la majorité des régions.

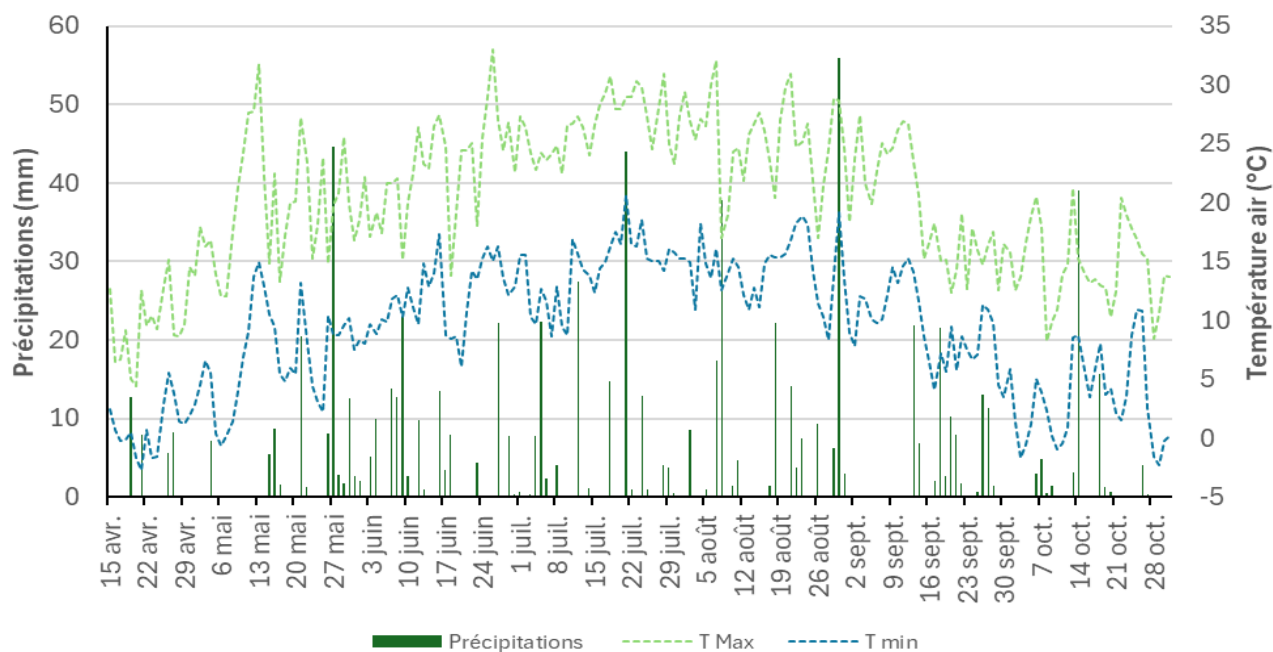


Figure 5. Données météorologiques (station de Saint-Antoine-de-Tilly) pendant la saison de croissance en 2022.

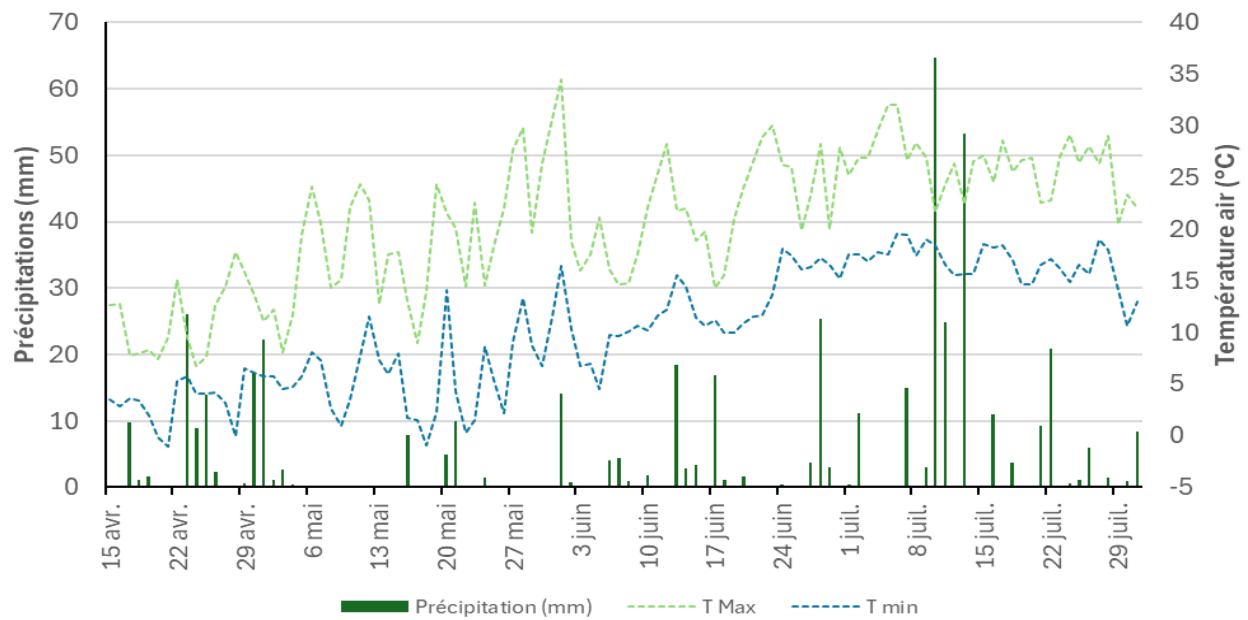


Figure 6. Données météorologiques (station de Saint-Antoine-de-Tilly) pendant la saison de croissance des brocolis en 2023.

4.2 CONTEXTE PÉDOLOGIQUE

4.2.1 Description initiale en début de rotation (2021)

Les sols rencontrés dans le champ à l'étude appartenaient à la série Saint-Nicolas. Cette série est apparentée aux séries Orléans et Saint-André. Elles se côtoient dans les régions pédologiques des Hautes-terrasses du Saint-Laurent (Appalaches) et de la Plaine littorale et des îles du Saint-Laurent. On retrouve la série Saint-Nicolas en zones de productions maraîchères de Lotbinière à Rivière-du-Loup en passant par l'île d'Orléans (Figure 7).

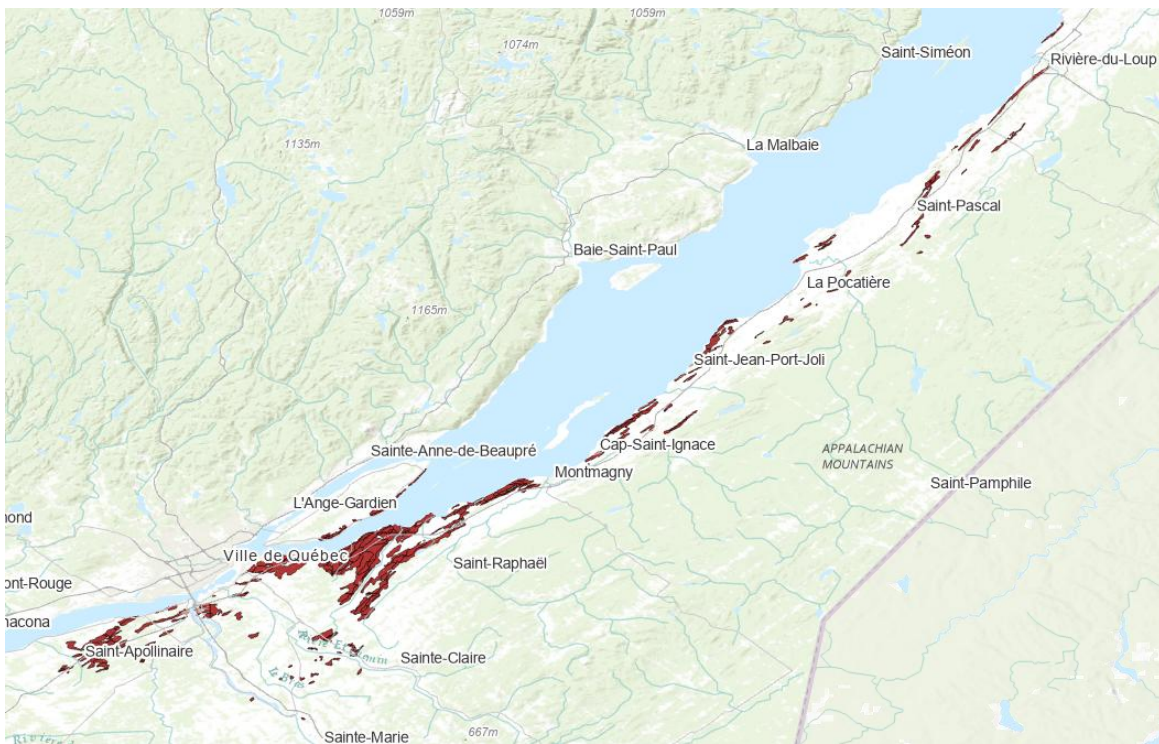


Figure 7. Répartition géographique de la série de sols Saint-Nicolas.

La série Saint-Nicolas est un sol résiduel, c'est-à-dire qu'il provient de l'altération de la roche mère. Il est composé d'un matériau squelettique-loameux. Un sol squelettique contient plus de 35 % de fragments (particules supérieures à 2 mm, schistes argileux plus ou moins dégradés) dans l'horizon B. Ces sols sont très poreux et perméables avec un drainage naturel rapide dû à la forte présence de fragments dans le profil. La quantité de fragments augmente également avec la profondeur. La réserve en eau utile est donc faible, ce qui rend ce sol vulnérable en cas de sécheresse. Il est donc très important de maintenir la MO et une bonne structure dans l'horizon de surface. Pour plus de détails sur la série Saint-Nicolas, une fiche synthèse de la série de sols est disponible sur le site internet de l'IRDA (IRDA, 2022).

Dans le cadre de l'*Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec* (EESSAQ) (Gasser et coll., 2023), l'état de santé des sols cultivés de la série Saint-Nicolas (groupe 11) a été inclus et a révélé une légère compaction de surface avec une augmentation de la masse volumique apparente et une diminution de la porosité totale dans les horizons Ap1 et Ap2. Une tendance à la baisse du contenu en MO a également été observée dans les horizons Ap1 et Ap2.

Le Tableau 3 et la Figure 8 présentent la granulométrie de surface des différentes répétitions (blocs) des deux dispositifs en début de projet en 2021. Les textures variaient d'argile sableuse à argile avec un contenu estimé en gravier de 25 à 44 %. Malgré la présence importante d'argile en surface, il est à noter que le régime hydrique n'était pas celui retrouvé dans un sol argileux en profondeur. Le contenu important en sable et en fragments dans l'horizon de surface (0-20 cm) rend ce sol difficile à structurer et augmente sensiblement sa vulnérabilité à la compaction de surface. De plus, le contenu en fragments dans l'horizon sous-jacent (horizon B) oscille autour de 60 % ce qui a un impact important sur le drainage naturel (rapide) et la capacité de rétention en eau (faible) de ces sols. Cependant, l'horizon B demeure moins sensible à la compaction que peut l'être l'horizon de surface.

Tableau 3. Granulométrie de l'horizon de surface (0-20 cm) des différentes répétitions (blocs) des dispositif hâtif et tardif.

Dispositif	Bloc	Sable	Limon	Argile	Texture
Hâtif	B1	48	12	40	AS
	B2	50	10	40	AS
	B3	48	11	41	AS
	B4	46	11	43	AS
Tardif	B1	42	15	43	A
	B2	44	13	43	A
	B3	44	13	43	A
	B4	46	13	41	AS

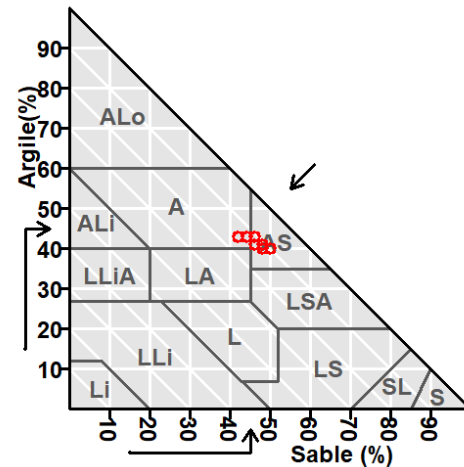


Figure 8. Triangle des classes texturales de sols avec positionnement des textures des dispositifs hâtif et tardif.

4.2.1.1 Description des profils de sols

Pour l'évaluation de la qualité structurale des sols du champ à l'étude, seul l'horizon de surface (Ap1 et Ap2) a été évalué. L'horizon B était similaire partout, soit très graveleux, avec une structure particulière. Une note a été donnée pour chacun des horizons évalués à l'aide de l'Indicateur de la qualité physique des sols minéraux (IQPSM) (Figure 9).



Figure 9. Profils complets avant l'implantation des dispositifs en 2021.

Le Tableau 4 présente la description morphologique et les résultats de l'IQPSM pour les horizons Ap1 et Ap2 de chaque profil réalisé avant le début du projet. Le niveau de qualité de la structure a été évalué à *modéré* pour les horizons Ap1 et Ap2 pour les deux profils réalisés, avec une note IQPSM moyenne de 5,7 (Ap1) et 5,6 (Ap2). Le grade, c'est-à-dire le degré de développement des agrégats, était généralement faible pour tous les horizons. De plus, la porosité était quasi absente. Dans l'horizon Ap2 du profil Pcomplet2, une structure grossière était observée avec une note de 4,7 pour cet horizon, soit la plus faible obtenue.

Tableau 4. Résultats de l'IQPSM des deux profils réalisés avant l'implantation des dispositifs (horizons Ap1 et Ap2).

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
Pcomplet1	Ap1	0-10	Granulaire, fine à moyenne, faible à modéré	Meuble	Absent	Absent	5,7	Modéré
	Ap2	10-25	Subangulaire, fine à moyenne, faible à modéré	Très friable	Absent	Peu abondant	6,5	Modéré
Pcomplet2	Ap1	0-10	Granulaire, fine à moyenne, faible à modéré	Meuble	Absent	Absent	5,7	Modéré
	Ap2	10-25	Subangulaire, grossière, faible	Friable	Absent	Absent	4,7	Modéré

4.3 CARACTÉRISATION DE LA SANTÉ GLOBALE DU SOL EN DÉBUT DE ROTATION

La section précédente a révélé que la qualité structurale du site étudié était modérée et caractérisée par une faible agrégation et une porosité quasi inexistante. Parallèlement, une évaluation globale de la santé du sol a été réalisée à l'aide d'indicateurs physiques, biologiques et chimiques, dont les résultats sont présentés au **Tableau 5. Caractérisation de la santé globale du sol en début de rotation dans chacun des dispositifs hâtif ou tardif, le 4 août 2021.** Tableau 5. Sans surprise, les indicateurs physiques, notamment la stabilité et la proportion des agrégats, ont obtenu des cotes inférieures à 30/100 (zone rouge), confirmant les conclusions de l'étude pédologique. À l'échelle du champ (moyenne des deux dispositifs), la cote de santé physique s'élevait à seulement 16/100, signalant un risque accru de faibles rendements et une dégradation de l'agroécosystème (Gauthier et Champagne, 2017). Au niveau des indicateurs biologiques, le sol présentait également des déficiences, en particulier au niveau de l'azote disponible (Azote labile N-NH₃) et du carbone facilement minéralisable par les microorganismes (Carbone actif (POXC)). Ceci explique que ce sol fournit peu d'énergie aux microbes capables de minéraliser la MO en N disponible et donc que cette fonction du sol est déficiente. L'activité microbienne (respiration C-CO₂) a obtenu une cote supérieure à 30/100 (jaune), tout comme le taux de matière organique (MO), ce qui signifie que le sol n'est pas optimal pour ces aspects, mais en meilleure condition que les deux indicateurs précédents. En effet, un des objectifs du PAD stipule que tous les sols devraient contenir un minimum de 4 % de MO alors que la teneur au site est en moyenne de 3,2 %. Finalement, les indicateurs biologiques ont obtenu une cote de 25,5/100 seulement, soit sous le seuil de 30/100. Au niveau des indicateurs chimiques, le pH se situait dans l'optimum des valeurs (vert) alors que les éléments P, K, Ca et Mg étaient considérés sous l'optimum. Ces résultats étaient prévisibles en fin de saison avant la destruction de la fraisière alors qu'aucune fertilisation n'avait été apportée. En régie conventionnelle, cette situation peut être corrigée relativement facilement par des apports en ces éléments via la fertilisation minérale. Néanmoins pour ces indicateurs, la cote de santé obtenue était supérieure aux cotes physiques et biologiques et équivalente à 44/100 en moyenne. Au global, les cotes physiques, biologiques et chimiques étaient donc basses avec en moyenne 33/100. Pour améliorer la santé du sol, des pratiques d'agriculture durable sont alors recommandées, soit l'implantation de CC dérobées ou intercalaires, le maintien d'une couverture du sol durant l'hiver et l'incorporation dans les rotations de prairies et de céréales, la réduction des passages de machinerie et de travail du sol, l'apport de biomasses organiques comme des pailis, des fumiers et des composts ou l'incorporation des résidus des cultures (Gauthier et Champagne, 2017). Le site étudié, en raison de sa faible cote de santé, constituait donc un bon candidat pour tester l'impact de ces stratégies, notamment l'inclusion de CC annuelles ou vivaces, en intercalaire ou à la dérobée, ainsi que l'ajout de pailis fauché-récolté.

Tableau 5. Caractérisation de la santé globale du sol en début de rotation dans chacun des dispositifs hâtif ou tardif, le 4 août 2021.

	2021	
	Dispositif hâtif	Dispositif tardif
Paramètres¹		
Physiques		
Stabilité des agrégats (%) (.25 à 2 mm)	37,5	39,3
Proportion d'agrégats (%) (.25 à 2mm)	40,6	44,0
Cote physique (/100)	15	17
Biologiques		
Respiration C-CO ₂ (ppm)	48	40
Azote labile N-NH ₃ (kg ha ⁻¹)	102	114
Matière organique (%)	3,0	3,3
Carbone actif (POXC) (ppm)	328	295
Cote biologique (/100)	25	26
Chimiques		
pH	6,2	6,0
Phosphore (kg ha ⁻¹)	1382	1270
Potassium (kg ha ⁻¹)	459	446
Magnésium (kg ha ⁻¹)	284	297
Calcium (kg ha ⁻¹)	3849	3604
Cote chimique (/100)	45	42
Cote globale (/100)	34	32

¹Les couleurs indiquent la classe de la cote de santé de chaque paramètre selon la notation du test de santé globale de AgroEnviroLab, du moins bon niveau au meilleur (rouge : cote entre 0 et 30 %, jaune : cote entre 31 et 70 %, vert : cote entre 71 et 100 %).

4.4 CROISSANCE DES CULTURES DE COUVERTURE ET RENDEMENT EN MAÏS SUCRÉ

4.4.1 Rotation avec maïs sucré hâtif

La biomasse et le contenu en N des cultures de couverture (CC) de la rotation avec maïs sucré hâtif, ainsi que l'impact de l'intégration de ces CC sur l'occurrence des mauvaises herbes (MH), le rendement en maïs sucré et les risques de pollution diffuse associés au lessivage du nitrate sont présentés aux sections 4.4.1.1 à 4.4.1.5.

4.4.1.1 Croissance et caractérisation de la biomasse aérienne des cultures de couverture

À la fin de la saison de croissance, le 15 octobre 2021, le mélange de CC avoine-pois avait produit 3,5 t ha⁻¹ de biomasse sèche (Figure 10), ce qui s'est traduit par un contenu total de N (N_{total}) dans la biomasse aérienne de 120 kg N_{total} ha⁻¹ (Tableau 6). La concentration en N de la biomasse était importante (3,4 %) et le ratio C/N, ainsi que l'indice de stabilité biologique (ISB) peu élevés. De ce fait, la part du N_{total} de la biomasse potentiellement disponible pour la culture suivante a été estimée à 84 kg N_{dispo} ha⁻¹ (voir section 3.3.3.1.1), soit 70 % du N_{total} . Cependant, puisque l'incorporation du mélange d'avoine-pois a eu lieu au printemps suivant (2022) et que la biomasse aérienne n'a pas survécu à l'hiver, une part moins importante en N_{dispo} a dû être disponible pour la saison de croissance du maïs sucré. Le statut azoté du sol (concentration en N-NO₃) en

post-levée du maïs le 23 juin 2022 pointe d'ailleurs en ce sens alors que, suivant la fertilisation de printemps, le Sol nu présente un contenu équivalent en nitrate à celui des parcelles avec précédent d'avoine-pois (Figure 11). Ce résultat est contraire à ceux de Langelier et coll. (2018) dans un essai au Québec où une CC de pois fourrager non incorporé à l'automne (détruite par le gel + semis direct), avec un contenu en N_{dispo} estimé à 63 kg ha^{-1} , a permis une hausse significative (2x plus) du nitrate du sol à la mi-mai de l'année suivante, comparativement au sol témoin sans CC. Toutefois, dans la présente étude, la caractérisation du sol a eu lieu beaucoup plus tard, au stade 4-6 feuilles du maïs, soit le 23 juin. Les semis du maïs remontaient au 6 mai, soit 47 jours plus tôt. Ainsi, il est possible que les apports de N provenant du mélange avoine-pois aient lessivé durant cette période et qu'ils n'étaient plus perceptibles au moment de l'échantillonnage. Cette période ayant été pluvieuse (220 mm de pluie) et la croissance du maïs lente, la part de N_{dispo} provenant de l'incorporation de la CC a donc pu être perdue avant d'être absorbée par la culture dont les besoins en N augmentent de façon marquée après le stade 6 feuilles. Dans une autre étude en Chaudière-Appalaches avec des CC présentant un contenu en N élevé et un C/N faible, lorsqu'incorporées au printemps, la majorité de leur N_{dispo} était justement disponible dès les premiers jours ou semaines suivant leur incorporation au printemps (Landry et coll., 2025). Des risques de lessivage sont donc possibles à ce moment si la culture principale n'est pas assez développée pour prélever le N disponible.

Pendant la croissance du maïs sucré en 2022, dans les traitements précédés d'un couvert d'avoine-pois, le mélange de prairie a été implanté soit en intercalaire, soit en post-récolte du maïs. La biomasse produite dans chacun de ces traitements avant la fauche des prairies l'année suivante (13 juin 2023) a varié selon le mode d'implantation (Tableau 6). Lorsque la prairie a été implantée en intercalaire (inter), une biomasse sèche de $3,9 \text{ t ha}^{-1}$ a été produite, contre $5,3 \text{ t ha}^{-1}$ avec le même mélange implanté à la dérobée (post). Cela signifie que, bien que la Prairie post ait été semée plus tard en saison, l'absence de compétition avec le maïs a permis une production de biomasse plus élevée. Cette différence s'explique également par la composition botanique des prairies. En intercalaire, le trèfle dominait le couvert à 80 %, surpassant largement les autres espèces du mélange. En revanche, dans le traitement post, le seigle, suivi du festulolium, constituait l'essentiel du couvert, tandis que le trèfle représentait moins de 50 % (Figure 10). Ainsi, avec la Prairie inter, la plus longue saison de croissance (151 jours) et la présence du maïs ont favorisé la croissance du trèfle qui est plus lente que les graminées, mais qui tolère mieux l'ombrage. En post, la fenêtre de croissance étant plus courte (95 jours), les graminées ont alors rapidement pris le dessus sur les légumineuses du mélange et la production de biomasse a été 36 % plus importante qu'en intercalaire. Au terme de leur croissance, avant la fauche l'année suivante, la concentration en N était 60 % plus importante avec la Prairie inter à dominance de légumineuses (2,4 vs. 1,5 % de N), ce qui s'est traduit par des contenus en N de $94 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$ contre $80 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$ avec la Prairie post. Le ratio C/N était également 64 % plus élevé avec la Prairie post en comparaison de la Prairie inter. Ainsi, même si leur ISB était similaire (Tableau 6), selon les estimations de Jobin et Douville (1996), la Prairie inter devait apporter 2x plus de N_{dispo} à la culture suivante, soit $47 \text{ kg } N_{\text{dispo}} \text{ ha}^{-1}$ contre $24 \text{ kg } N_{\text{dispo}} \text{ ha}^{-1}$ avec la Prairie post. En revanche, la Prairie post a apporté 1,4x plus de C facilement dégradable (Tableau 6, C soluble : 51 %) que la Prairie inter, soit la principale source de nourriture pour les microorganismes du sol. Malgré leurs propriétés différentes, les deux modes d'implantation des prairies ont donc présenté des avantages positifs pour améliorer la santé des sols, soit en augmentant la fertilité azotée, soit en stimulant l'activité microbienne du sol.

En conclusion, bien que la Prairie inter ait produit moins de biomasse que la Prairie post, la plus forte proportion de légumineuses dans le mélange a eu un impact non négligeable sur le retour azoté estimé de cette CC. De plus, l'implantation en intercalaire, réalisée lors du dernier sarclage du maïs, a permis d'éviter un travail du sol pour planter la prairie, ce qui constitue un bénéfice supplémentaire pour la conservation des sols. À l'inverse, la Prairie post a nécessité un passage de rotoculteur après la récolte du maïs en 2022 pour incorporer les résidus avant le semis du mélange de prairie. Néanmoins ce mode d'implantation a permis une plus grande production de biomasse et un apport important de C facilement dégradable. Enfin, étant donné la faible implantation des graminées en intercalaire (moins de 20 % du couvert), leur proportion dans le mélange pourrait être revue à la baisse dans ce type de traitement.

Tableau 6. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s.)) des cultures de couverture (CC) du dispositif hâtif (contenus en azote (N), C_{soluble} , C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux C, N et estimé en N disponible), avant les gelées d'automne (15 octobre 2021), en post-récolte du maïs sucré hâtif (automne 2022) et juste avant la fauche des prairies (13 juin 2023).

Paramètres b.s.	2021	2022		2023	
	Automne	Automne		Avant fauche	
	Avoine+ pois	Prairie* inter	Prairie post	Prairie inter	Prairie post
Biomasse CC (kg ha^{-1})	3529	2756	966	3923	5311
Jours de croissance	61	108	52	43	43
N (%)	3,4			2,4	1,5
C/N	12			17	28
ISB (%)	13			14	13
C total kg ha^{-1}	1470			1613	2223
C soluble (%)	60			58	51
N total (kg ha^{-1})	120			94	80
N disponible (kg ha^{-1})**	84			47	24

*Prairie : seigle d'automne, festulolium, mélilot et trèfle rouge

** Estimé selon la méthode Jobin et Douville 1996

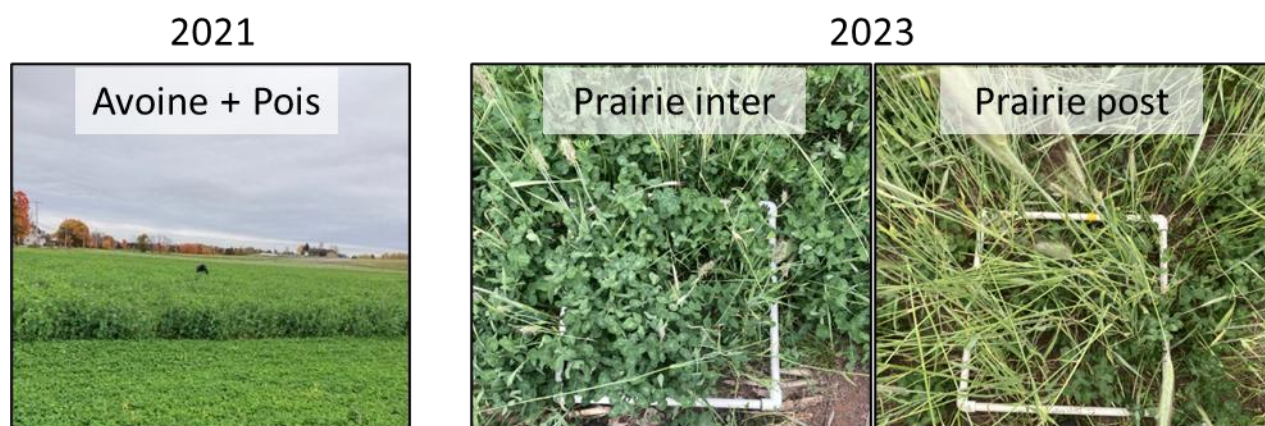


Figure 10. Biomasse produite dans le dispositif hâtif avec le mélange Avoine-Pois avant les gelées d'automne (15 octobre 2021) (à gauche), ainsi que par la prairie semée en intercalaire ou en post-récolte dans le maïs sucré en 2022, juste avant la fauche l'année suivante (13 juin 2023) (à droite).

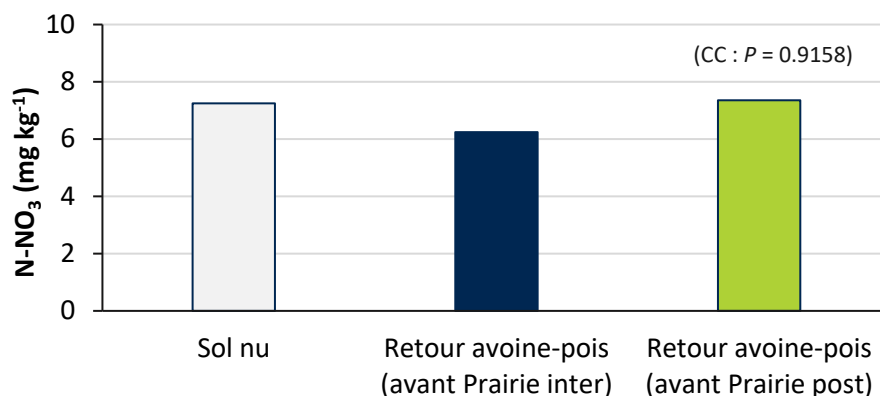


Figure 11. Concentration en N-NO₃ du sol en 2022 suivant l'incorporation de la culture de couverture (CC) avoine-pois, au stade 4-6 feuilles du maïs, juste avant le fractionnement de l'engrais N, dans le dispositif hâtif, le 23 juin 2022. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.4.1.2 Croissance et caractérisation des cannes de maïs

À la fin de la croissance du maïs, juste après la récolte des épis (19 août 2022), les prélèvements en éléments C, N, P et K totaux des cannes de maïs en fonction des traitements de CC ont été analysés et sont présentés au Tableau 7. Ces données sont pertinentes pour évaluer les nutriments qui retournent au sol, susceptibles d'être utilisés par les cultures suivantes puisque cette biomasse, contrairement aux épis, n'est pas exportée du champ. Peu importe le traitement de CC, les contenus en P et K se sont révélés bas avec 9 kg P_{total} ha⁻¹ et 45 kg K_{total} ha⁻¹. Quant à la concentration en N, elle était également basse (1,2 à 1,5 %), peu importe le traitement, même si les cannes étaient toujours vertes au moment de l'analyse (Figure 12). De plus, le ratio C/N était élevé (28 à 35). Ainsi, bien que les prélèvements en N_{total} des cannes étaient en moyenne de 32 kg N_{total} ha⁻¹, à peine 10 kg N_{dispo} ha⁻¹ ont été estimés disponibles pour la culture suivante. Cette biomasse ne peut donc pas être considérée comme une source d'azote concrète pour la culture subséquente. Cette biomasse retournera toutefois 1027 kg C ha⁻¹ en moyenne, dont 50 % soluble (Tableau 7). En effet, l'ISB de cette biomasse étant peu élevé (≈12), elle ne devrait pas être considérée comme un amendement même si son C/N est élevé, mais plus comme une source de C facilement utilisable par les microorganismes du sol. Des valeurs de C/N entre 20 et 30 sont souvent associées à des amendements tels que des fumiers solides compostés ou des composts de résidus végétaux (Landry et coll., 2011), soit des biomasses qui auront une minéralisation lente de leur contenu en C et N organique, mais cette résistance à la dégradation se confirme chez ces produits par leurs ISB également élevés (entre 40 et 60) (Roudaut et coll., 2011). Dans le cas des cannes de maïs, elles se dégraderont rapidement (ISB bas), mais leur contribution en azote pour la culture suivante devrait demeurer limitée (C/N élevé et contenus en N_{total} bas). Elles ne sont donc ni une source d'azote ni un amendement organique, mais plutôt une source de carbone labile rapidement disponible (ISB bas, C_{soluble} élevé).

Tableau 7. Caractéristiques de la biomasse sèche des cannes de maïs du dispositif hâtif (contenus en carbone (C), azote (N), C_{soluble}, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N, phosphore (P), potassium (K) et estimé en N disponible), en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), à la fin de la saison de croissance (19 août 2022).

Traitement	Biomasse (kg ha ⁻¹)	C (%)	N (%)	C/N	ISB (%)	C _{soluble} (%)	C _{total}	Prélèvements			
								N _{total}	N _{dispo}	P _{total}	K _{total}
								(kg ha ⁻¹)			
Sol nu	2639 ^{ns}	41	1,2	34	11	50	1082	32	8	9	46
Prairie inter	2360 ^{ns}	41	1,2	35	12	51	968	28	7	8	41
Prairie post	2515 ^{ns}	41	1,5	28	13	51	1031	37	11	9	46

ns : différences non significatives à $P = 0.2365$



Figure 12. Aspect général des tiges de maïs à la récolte dans le dispositif hâtif et aperçu de la prairie semée en intercalaire (11 août 2022).

4.4.1.3 Impact des cultures de couverture sur le contrôle des mauvaises herbes.

L'évolution de la couverture du sol par les mauvaises herbes (MH) a été suivie à différents moments au cours de la saison de croissance du maïs. La **Figure 13** présente les couverts moyens en MH en fonction des différents traitements. Jusqu'à la récolte, le Sol nu et la Prairie post n'avaient pas de CC, toutefois ce dernier traitement était précédé d'une CC d'avoine-pois, contrairement au sol toujours laissé à nu. Cette différence n'a cependant pas entraîné de réduction notable du couvert en MH. À la récolte, ces traitements présentaient entre 30 et 40 % de couverture par les MH (**Figure 13** et **Figure 14**). Entre le stade soies et la récolte, c'est principalement la présence de la Prairie inter qui a réduit l'occurrence des MH. En fin de saison toutefois, après le travail de sol dans les parcelles avec la Prairie post, une diminution marquée des MH a été notée et ce traitement présentait alors aussi peu de MH que celui avec la Prairie inter (couvert inférieur à 5 %). En revanche, le traitement avec Sol nu présentait alors la plus forte pression en MH de la saison, avec 40 % de couverture. Ainsi, l'implantation d'une prairie intercalaire a permis un contrôle plus efficace et durable des MH tout au long de la saison. Bien que le travail du sol ait temporairement réduit la couverture en MH dans le traitement avec Prairie post, l'effet résiduel de la CC avoine-pois implantée en 2021 semble avoir été négligeable sur la pression en MH pendant la saison en 2022.

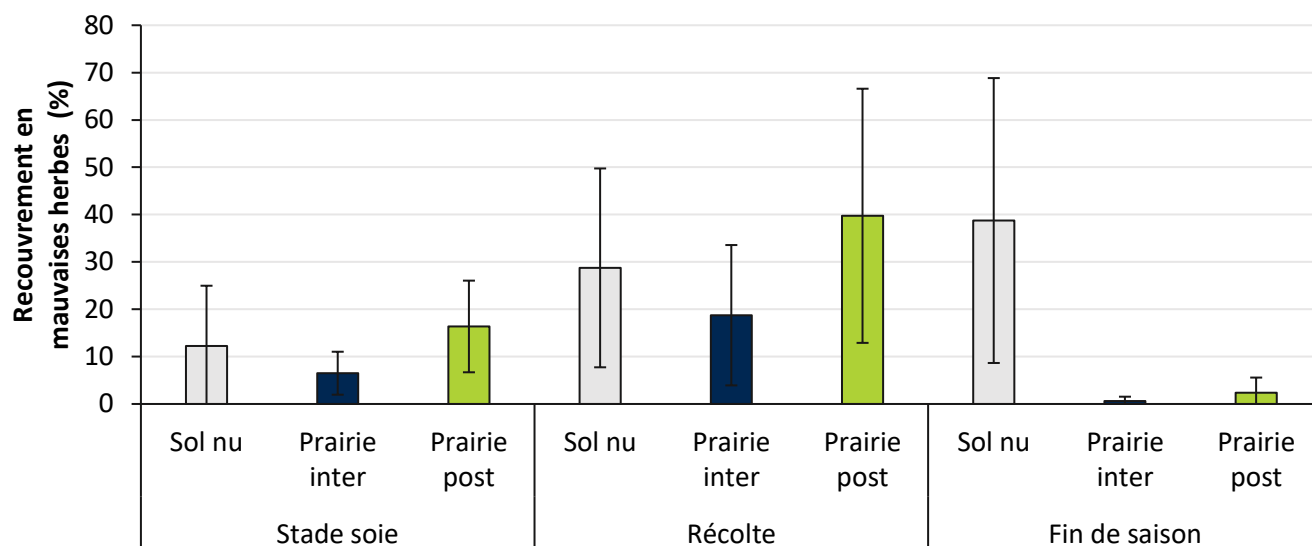


Figure 13. Recouvrement en mauvaises herbes (%) au stade soies (22 juillet 2022), à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) et avant les gelées d'automne (17 octobre 2022), dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC). Moyennes et écart-types des données brutes.

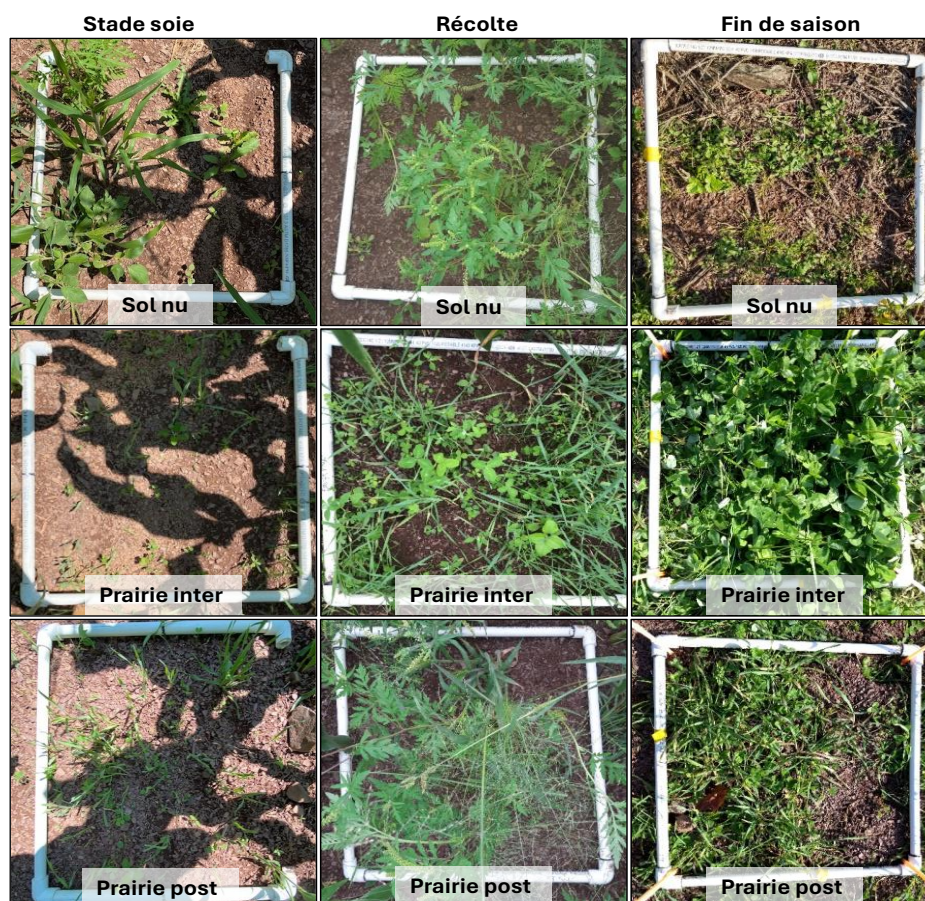


Figure 14. Croissance des mauvaises herbes à différents moments pendant la saison de croissance 2022 dans le dispositif avec maïs sucré hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).

4.4.1.4 Rendements du maïs sucré hâtif

Les rendements en épis (g épis^{-1}) n'ont pas été significativement différents en fonction des traitements avec ou sans CC (Figure 15), avec une moyenne globale de 264 g épis^{-1} . Dans le contexte où 85 % de la dose recommandée en N a été apportée, il était attendu que le N_{dispo} issu de la CC avoine-pois de l'automne précédent (voir section 4.4.1.1) supporte un rendement plus élevé que celui produit par le traitement Sol nu (aucune CC). Les teneurs en nitrate du sol mesurées au stade 4-6 feuilles n'allaient toutefois pas en ce sens (Figure 11). Il convient également de noter que les conditions printanières de 2022 n'ont pas été favorables à une levée uniforme du maïs sucré (voir section 4.1). Des conditions chaudes et sèches après les semis ont compromis la levée, nécessitant un second semis manuel pour combler les manques. Par la suite, des précipitations importantes (accumulation de 261 mm de mai à juin) ont ralenti la croissance de sorte que le maïs a atteint le stade 4-6 feuilles 42 jours après les semis. Afin d'éviter tout biais, les mesures de rendement ont donc été réalisées uniquement sur des plants issus de la première levée, sélectionnés pour leur vigueur. Cette méthode a toutefois entraîné une disparité importante dans le nombre d'observations entre les traitements : Sol nu ($n=4$, 179 obs.), Prairie post ($n=4$, 104 obs.), Prairie inter ($n=3$, 50 obs.). Cette hétérogénéité pourrait expliquer l'absence de différence significative entre les traitements, ainsi que l'absence d'effet mesurable du précédent avoine-pois, puisque la croissance du maïs n'a pas été optimale. De plus, tel que mentionné à la section 4.4.1.1, le N additionnel apporté par les CC a pu être lessivé par les pluies du printemps alors que le maïs n'était pas encore assez développé pour le prélever, ce qui peut également expliquer l'absence d'effet mesurable du précédent de CC.

Un taux quand même plus important d'épis déclassés a été mesuré dans le traitement Sol nu (6,6 %), comparativement à la Prairie inter (0 %) (Figure 16), alors que dans les parcelles Prairie post (3,3 %) le déclassé n'était pas significativement différent du Sol nu ou de la Prairie inter. Encore une fois, le nombre d'observations beaucoup plus élevé avec le traitement Sol nu peut expliquer ces différences. Néanmoins, le taux global de déclassé est resté faible, ce qui s'explique probablement par la sélection des plants sains provenant de la première levée. Ainsi, les rendements totaux ont été équivalents aux rendements vendables (données non montrées).

Sur le plan qualitatif, les épis vendables étaient de bonne qualité dans tous les traitements (Figure 17). Les grains étaient bien remplis et alignés et tous avaient atteint une maturité comparable. Seul le traitement avec Prairie inter présentait légèrement plus d'épis avec des extrémités partiellement remplies (Figure 17).

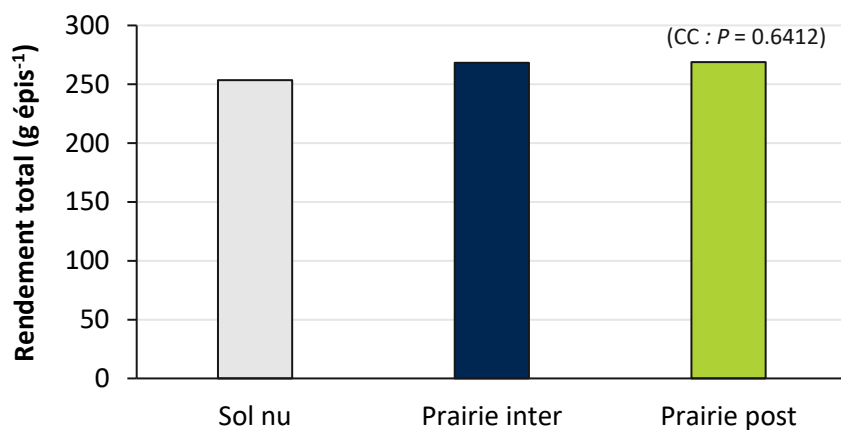


Figure 15. Rendements totaux en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) (Sol nu ($n=4$, 179 obs.), Prairie post ($n=4$, 104 obs.), Prairie inter ($n=3$, 50 obs.)). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

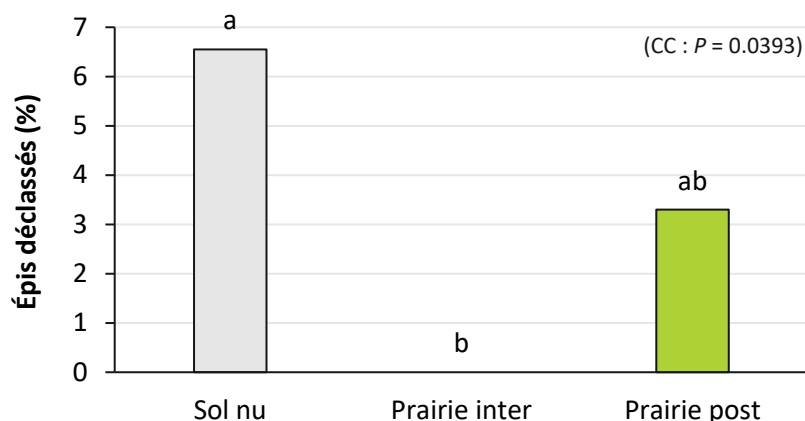


Figure 16. Taux d'épis déclassés (%) à la récolte du maïs sucré (11 août 2022) dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) (Sol nu (n=4, 179 obs.), Prairie post (n=4, 104 obs.), Prairie inter (n=3, 50 obs.)). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.



Figure 17. Qualité des grains après la récolte (11 août 2022), pour six épis vendables par parcelle, dans le dispositif hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).

4.4.1.5 Risques de pollution diffuse en nitrate

À la fin de la saison de croissance 2021, la concentration en N-NO_3 résiduel dans le sol nu était 12x plus importante que dans les sols avec CC avoine-pois ($3,7 \text{ mg kg}^{-1}$ vs $0,31 \text{ mg kg}^{-1}$ de sol). La présence de la CC (avoine-pois) semble donc avoir permis un recaptage du nitrate résiduel présent dans la couche 0-30 cm du sol (Figure 18a). En effet, le N-NO_3 résiduel reste dans le sol après la saison de croissance, jusqu'à ce qu'il soit perdu dans les eaux de drainage ou qu'il soit recapté par une culture de fin de saison (AAC, 2021). Le nitrate résiduel présente ainsi un risque pour l'environnement, proportionnel aux quantités présentes au moment où les prélèvements cessent. En date du 15 octobre, les concentrations mesurées étaient cependant peu élevées dans tous les traitements puisque c'est avec une concentration en N-NO_3 supérieure à 15 mg kg^{-1} qu'il y a un risque de lessivage par sur-fertilisation N (Giroux et Lemieux, 2006). Toutefois, le sol à ce site ayant une forte proportion de gravier (24-44 %, voir section 4.2.1), il se draine facilement. Il ne peut donc être exclu que la faible concentration en N-NO_3 résiduel du Sol nu soit due au lessivage rapide du nitrate (vs. prélèvement par la culture) dans ce type de sol pour un élément hautement soluble comme le nitrate. En automne 2022, l'intégration de la prairie en intercalaire a également permis une meilleure capture et rétention du nitrate, même si la concentration mesurée dans le sol était quasi nulle dans tous les traitements (Figure 18b). En plus du caractère drainant du sol, la fertilisation réduite en N (85 % de la dose recommandée) du maïs en 2022 a pu également contribuer à laisser peu de N résiduel en fin de saison 2022.

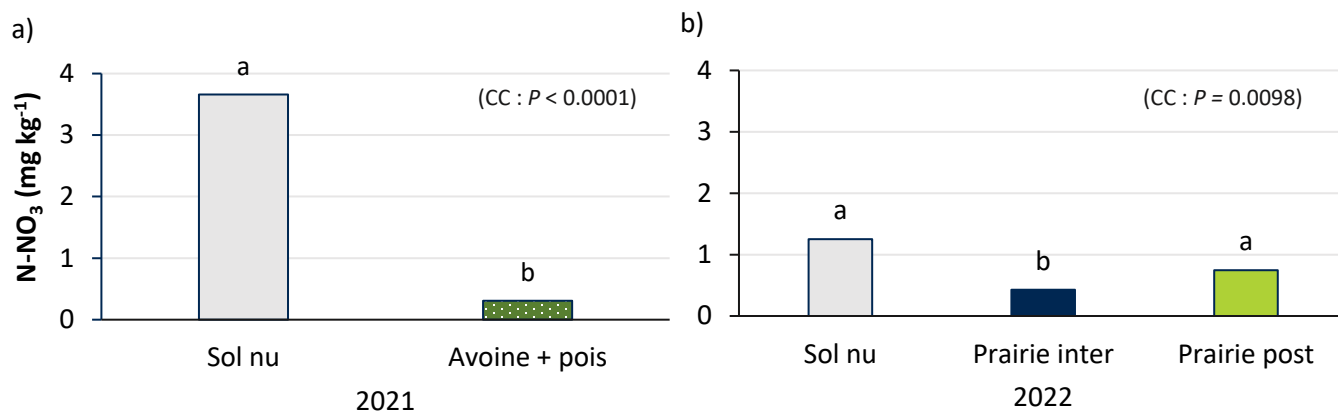


Figure 18. Concentration en nitrate (N-NO₃) résiduel du sol du dispositif hâtif à la fin de la saison a) 2021 (15 octobre) et b) 2022 (17 octobre 2022) en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.4.2 Dispositif avec maïs sucré tardif

La biomasse et le contenu en N des cultures de couverture (CC) du dispositif avec maïs sucré tardif, ainsi que l'impact de l'intégration de ces CC sur l'occurrence des mauvaises herbes (MH), le rendement en maïs sucré et les risques de pollution diffusive associés au lessivage du nitrate sont présentés aux sections 4.4.2.1 à 4.4.2.5.

4.4.2.1 Croissance et caractérisation des cultures de couverture

À la fin de la saison de croissance, le 15 octobre 2021, la prairie semée après la destruction de la fraisière a produit 0,8 t ha⁻¹ de biomasse sèche (Figure 19). L'année suivante, juste avant sa fauche et son incorporation, elle avait atteint 7,0 t ha⁻¹. La prairie implantée en 2021 (dispositif tardif) présentait donc une proportion plus élevée de légumineuses (50-70 % de trèfles) (données non montrées, Figure 19) que la Prairie post dans le dispositif hâtif en 2022 (voir section 4.4.1.1). Cette composition s'est traduite par un prélèvement total de 228 kg N_{total} ha⁻¹ dans la biomasse aérienne au 7 juin 2022 (Tableau 8), avec une concentration en azote de 3,3 %, un ratio C/N faible (12) et un indice de stabilité biologique (ISB) également bas (17-20). Ainsi, la quantité d'azote potentiellement disponible pour la culture suivante a été estimée à 148 kg N_{dispo} ha⁻¹, soit 65 % du N_{total}. Ces résultats sont très intéressants lorsqu'ils sont mis en perspective avec ceux obtenus avec le même mélange de prairie semé à la dérobée dans le dispositif hâtif (Prairie post), en fin de saison 2022 (voir section 4.4.1.1). En 2021, dans le dispositif tardif, la prairie a eu 61 jours de croissance, contre 52 jours pour la Prairie post en 2022 dans le dispositif hâtif, mais toutes deux ont produit une biomasse sèche presque comparable (2021 : 823 t ha⁻¹, 2022 (Prairie post) : 966 t ha⁻¹). Toutefois, les conditions météorologiques ont favorisé davantage les légumineuses en 2021 et davantage les graminées en 2022 (voir section 4.4.1.1). De la reprise à la fauche en 2022, la prairie de 2021 a eu 37 jours de croissance soit 6 jours de moins que le mélange semé en 2022 (Prairie post), avant sa fauche en 2023. Cette plus courte période a certainement contribué à une biomasse plus riche en N, avec un ratio C/N de seulement 12 (Tableau 8), contre 28 pour la Prairie post (Tableau 6). Aussi, avant sa fauche, la prairie de 2021 avait produit 1,7 t ha⁻¹ (basse sèche) de biomasse de plus que la prairie semée en 2022 (Prairie post). Ces écarts soulignent l'influence déterminante des conditions météorologiques sur la croissance, la composition végétale et le retour azoté des prairies semées en post-récolte : 148 kg N_{dispo} ha⁻¹ pour la prairie de 2021 contre 24 kg N_{dispo} ha⁻¹ pour la prairie de 2022 (Prairie post, Tableau 6), une différence remarquable de 124 kg N_{dispo} ha⁻¹. Malgré cette disparité, les deux mélanges présentaient un ISB inférieur à 20 avec 50 % de C_{soluble} suggérant une minéralisation rapide de la biomasse, sans grande résistance à la dégradation microbienne.

La prairie de 2021 dans le dispositif tardif a été incorporée le 7 juin 2022 et le maïs sucré (tardif) a été semé deux semaines plus tard. Au stade 4-6 feuilles du maïs (15 juillet 2022), soit 38 jours plus tard, la concentration en N-NO₃ du sol des traitements sous retour de la prairie était significativement plus élevée ($P = 0.0032$) que celle du Sol nu, de 2,4x (Figure 20). Contrairement à ce qui avait été observé avec le mélange avoine-pois après 47 jours (dispositif hâtif) (Figure 11), une augmentation notable de la disponibilité en azote pour le maïs a pu être mesurée, plus d'un mois après l'incorporation de

la prairie dans le dispositif tardif. Cette meilleure disponibilité pourrait s'expliquer par l'incorporation de la prairie alors qu'elle était encore verte, ou par des conditions météorologiques plus favorables (températures plus chaudes) au moment de l'incorporation, en comparaison avec le mélange avoine-pois incorporé plus tôt au printemps 2022. Les précipitations, donc les risques de lessivage, ont néanmoins été comparables pour la période entre les semis et le stade 4-6 feuilles dans le dispositif hâtif (220 mm) ou le dispositif tardif (190 mm), mais la T° moyenne de l'air était plus chaude pour cette période de croissance avec le maïs tardif (18 °C) qu'avec le maïs hâtif (15 °C), ce qui a pu contribuer à une minéralisation plus rapide du N organique provenant de la CC. Toutefois, c'est probablement le fait que la CC de prairie du dispositif tardif contenait 148 kg N_{dispo} ha⁻¹ contre 84 kg N_{dispo} ha⁻¹ avec la CC avoine-pois du dispositif hâtif, qui a favorisé la hausse de la concentration en N-NO₃ du sol au stade 4-6 feuilles pour le maïs tardif.

Enfin, après l'incorporation de la prairie et le semis de maïs sucré tardif en 2022, le Trèfle inter ou le Raygrass inter ont bénéficié de 92 jours de croissance avant la fin de la saison. Le Trèfle inter s'est mieux implanté et a produit 3,2x plus de biomasse sèche que le Raygrass inter soit 1,5 t ha⁻¹ contre 0,5 t ha⁻¹ (Tableau 8). Sans surprise, le Trèfle inter, une légumineuse, a produit 6,4x plus de N_{total} que le Raygrass inter (45 vs 7 kg N_{total} ha⁻¹). Malgré des ISB similaires, le Raygrass inter avait un rapport C/N plus élevé que le Trèfle inter (25 vs. 14). Ainsi, un retour azoté de 27 kg N_{dispo} ha⁻¹ a alors été estimé pour le Trèfle inter alors qu'il a été estimé comme négligeable pour le Raygrass inter (Tableau 8).

Tableau 8. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s)) des cultures de couverture (CC) du dispositif tardif (contenus en azote (N), C_{soluble}, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N et estimé en N disponible), avant les gelées d'automne (15 octobre 2021) et avant la fauche (7 juin 2022), ainsi qu'à la fin de la saison de croissance (17 octobre 2022).

Paramètres b.s.	2021	2022		
	Automne	Avant fauche	Automne	
	Prairie post*	Prairie post	Trèfle inter	Raygrass inter
Biomasse CC (kg ha ⁻¹)	823	7017	1503	469
Jours de croissance	61	37	92	92
N (%)	.	3,3	3,0	1,6
C/N	.	12	14	25
ISB (%)	.	17	20	17
C total (kg ha ⁻¹)	.	2806	588	191
C soluble (%)	.	55	65	65
N total (kg ha ⁻¹)	.	228	45	7
N disponible (kg ha ⁻¹)**	.	148	27	2

*Prairie : seigle d'automne, festulolium, mélilot et trèfle rouge

** Estimé selon la méthode Jobin et Douville 1996



Figure 19. Prairie implantée dans le dispositif tardif après la fraisière en 2021 (15 octobre 2021) et juste avant la fauche l'année suivante (7 juin 2022).

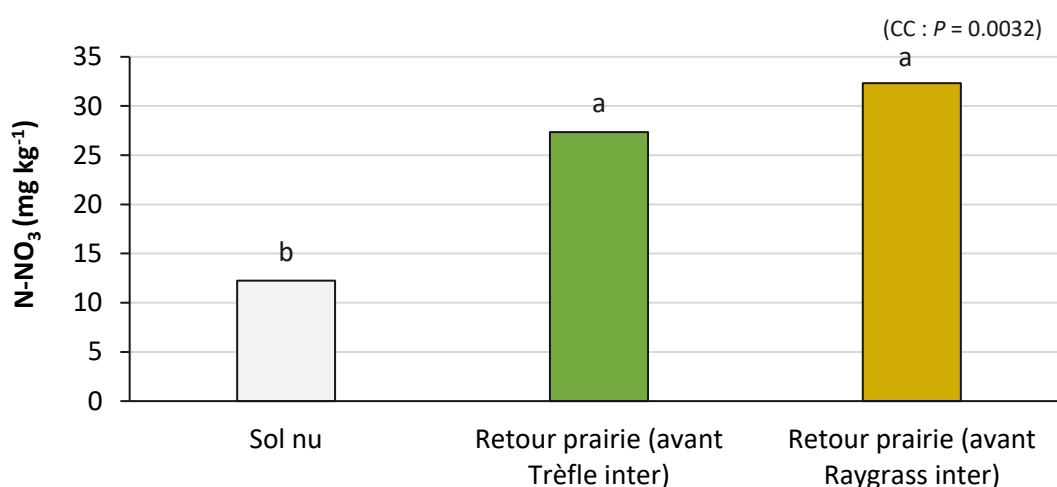


Figure 20. Concentration en N-NO₃ du sol en fonction du traitement sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC, prairie implantée à la dérobée en 2021), au stade 4-6 feuilles du maïs, juste avant le fractionnement de l'engrais et les semis des cultures de couverture en intercalaire (CCI), le 15 juillet 2022. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.4.2.2 Croissance et caractérisation des cannes de maïs tardif en 2022

À la fin de la croissance du maïs, juste après la récolte des épis (12 septembre 2022), les prélèvements totaux en nutriments C, N, P et K des cannes de maïs ont été analysés et sont présentés au Tableau 9. Comme pour le maïs hâtif (voir section 4.4.1.2), les apports potentiels par l'incorporation de cette biomasse se sont révélés relativement modestes, avec environ 10 kg P_{total} ha⁻¹ et 58 kg K_{total} ha⁻¹. Quant à la concentration en N, elle était basse (0,8 à 1,2 %), et même si les cannes étaient toujours vertes au moment de l'analyse (Figure 21), le ratio C/N était élevé (36 à 50), surtout avec les cannes du traitement Sol nu (C/N = 50). En effet les cannes de ce traitement ont prélevé le moins de N (28 kg N ha⁻¹) et leur biomasse était la plus lignifiée au moment de la récolte (C/N élevé) probablement car ces plants ont eu accès à moins de N. En comparaison, les cannes issues des traitements avec Trèfle inter ou Raygrass inter avaient prélevé autant de N, 45,5 kg N_{total} ha⁻¹, soit 1,6x plus que le Sol nu et présentaient un ratio C/N de 37. Bien que les prélèvements en N_{total} des cannes avec CC étaient en moyenne de 46 kg N total ha⁻¹, à peine 11 kg N_{dispo} ha⁻¹ ont été estimés disponibles pour la culture suivante. Quant aux cannes du traitement Sol nu, l'apport en N a été estimé nul pour la culture subséquente. La biomasse des cannes toutefois, tous traitements confondus, retournera 1571 kg C ha⁻¹ en moyenne, dont 46 % soluble, soit une source non négligeable de C labile. Ainsi, cette biomasse ne peut pas être considérée comme une source d'azote significative, mais puisque l'ISB est

faible (≈ 12), tout comme dans le dispo hâtif (Tableau 7), ces cannes ne sont pas non plus un amendement, mais une source de C facilement dégradable par les microorganismes.

Tableau 9. Caractéristiques de la biomasse sèche des cannes de maïs (contenus en carbone (C), azote (N), C_{soluble} , C/N et indice de stabilité biologique (ISB)) ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N, phosphore (P), potassium (K) et estimé en N disponible), à la fin de la saison de croissance (12 septembre 2022), en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), dans le dispositif tardif.

Dispositif	Traitement	Biomasse (kg ha ⁻¹)	C (%)	N (%)	C/N	ISB (%)	C_{soluble} (%)	Prélèvements				
								C	N	N _{dispo} (kg ha ⁻¹)	P	K
Tardif	Sol nu	3326 ^{ns}	42	0,8	50	13	45	1397	28	-	7,4	49,7
	Trèfle inter	3908 ^{ns}	43	1,2	37	12	45	1680	46	11	11,1	61,3
	Raygrass inter	3804 ^{ns}	43	1,2	36	11	47	1636	45	11	11,5	63,1

ns : différences non significatives à $P = 0.6352$



Figure 21. Aspect général des tiges de maïs à la récolte dans le dispositif tardif, le 12 septembre 2022.

4.4.2.3 Impact des cultures de couverture sur le contrôle des mauvaises herbes

La Figure 22 présente les couverts moyens en MH en fonction des différents traitements. Au stade soies du maïs, la pression en MH était similaire dans tous les traitements, probablement dû au fait que le maïs avait été sarclé au stade 4-6 feuilles. À la récolte, la pression en MH avait tendance à être plus élevée dans le Sol nu, tandis que la présence du Trèfle inter et, dans une moindre mesure, celle du Raygrass inter ont permis une meilleure répression des MH (Figure 22 et Figure 23). La pression en MH a été somme toute inférieure dans le dispositif tardif, contrairement au dispositif hâtif, ce qui peut s'expliquer par le cycle de croissance des MH. Implanté plus tôt, le maïs hâtif a subi une pression plus importante des MH, surtout des annuelles qui croissent rapidement au printemps, surtout dans des conditions propices comme au printemps 2022 (voir section 4.1). Dans le dispositif tardif, le travail de sol avant les semis du maïs effectué plus tardivement a certainement permis un meilleur contrôle des MH.

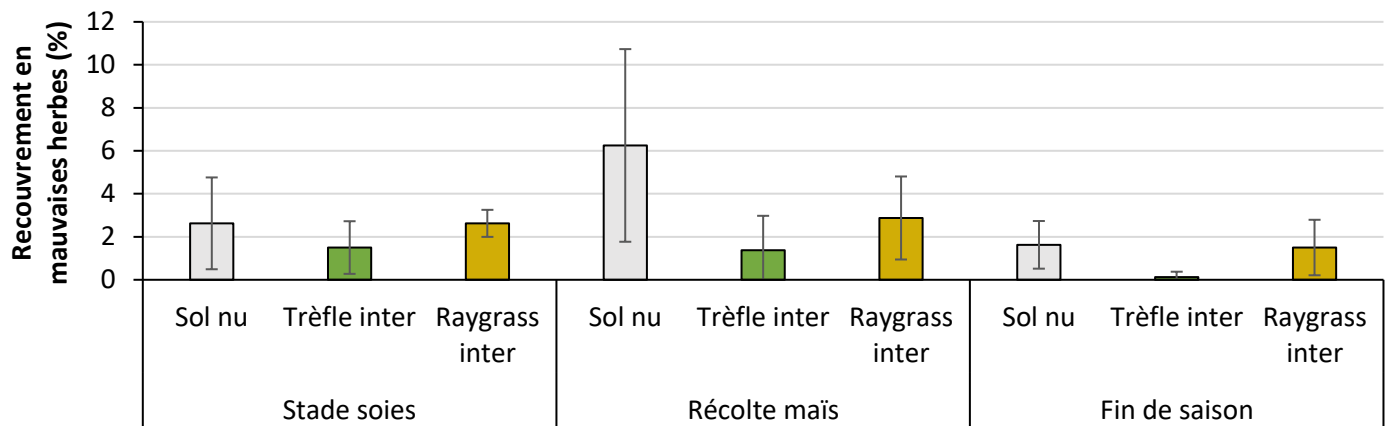


Figure 22. Recouvrement des mauvaises herbes (%) au stade soies (17 août 2022), à la récolte du maïs sucré (9 septembre 2022) et en fin de saison (17 octobre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC). Moyennes et écart-types des données brutes.



Figure 23. Croissance des mauvaises herbes à différents moments pendant la saison de croissance 2022 dans le dispositif avec maïs sucré tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).

4.4.2.4 Rendements du maïs sucré tardif en 2022

Les rendements en épis (g épis⁻¹) ont varié significativement selon la présence ou non de CC (Figure 24 et Figure 25). Le rendement total obtenu avec le Sol nu était 16,5 % plus faible que les traitements avec CC, atteignant 284 g épis⁻¹, comparativement à 340 g épis⁻¹ en moyenne pour les traitements avec Trèfle inter et Raygrass inter, quant à eux non statistiquement différents l'un de l'autre. Le taux d'épis déclassés était également beaucoup plus élevé avec le Sol nu (20 %), contrairement aux traitements avec CC (≈6 %) ($P = 0.0249$) (Figure 26). En conséquence, les rendements vendables ont été les plus faibles avec le Sol nu, avec 301 g épis⁻¹ contre 344 g épis⁻¹ en moyenne avec le Trèfle inter et le Raygrass inter. Les retours de prairie combinés aux cultures intercalaires ont donc favorisé des meilleurs rendements totaux et vendables du maïs sucré tardif. Dans un contexte de fertilisation inférieure (85 % de la dose recommandée en azote), l'apport important en azote estimé à la suite de l'incorporation de la prairie (148 kg N_{dispo} ha⁻¹, Tableau 8) confirmé par l'augmentation du contenu en nitrate du sol au stade post-levée du maïs (Figure 20), a probablement contribué à l'avantage des traitements avec CC en comparaison du Sol nu.

Concernant la qualité visuelle des épis vendables (Figure 27), celle-ci était globalement bonne pour l'ensemble des traitements. Toutefois, les épis issus du Sol nu présentaient plus fréquemment un remplissage incomplet des grains, malgré une maturité comparable à celle des autres traitements.

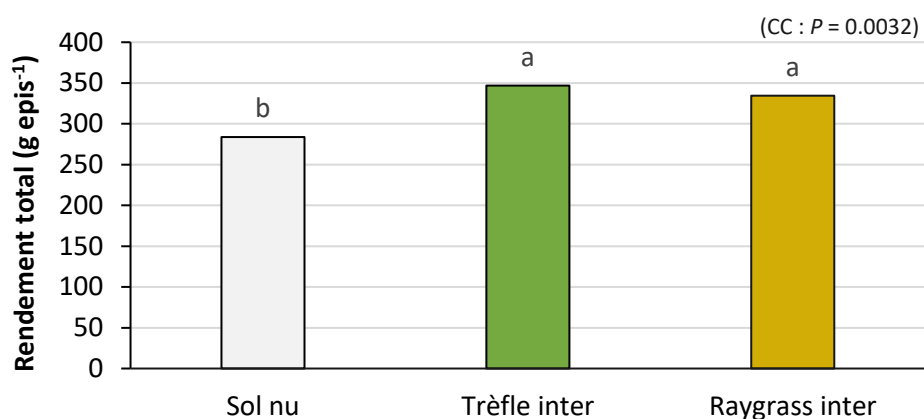


Figure 24. Rendements totaux en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) (Sol nu (n=4, 184 obs.), Trèfle inter post (n=4, 167 obs.) et Raygrass inter (n=4, 174 obs.)). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

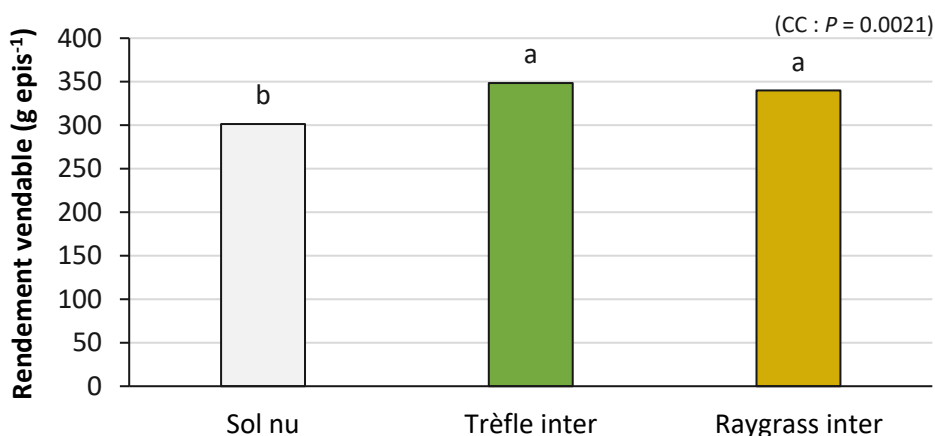


Figure 25. Rendements vendables en épis frais obtenus à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) (Sol nu (n=4, 148 obs.), Trèfle inter post (n=4, 159 obs.) et Raygrass inter (n=4, 162 obs.)). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

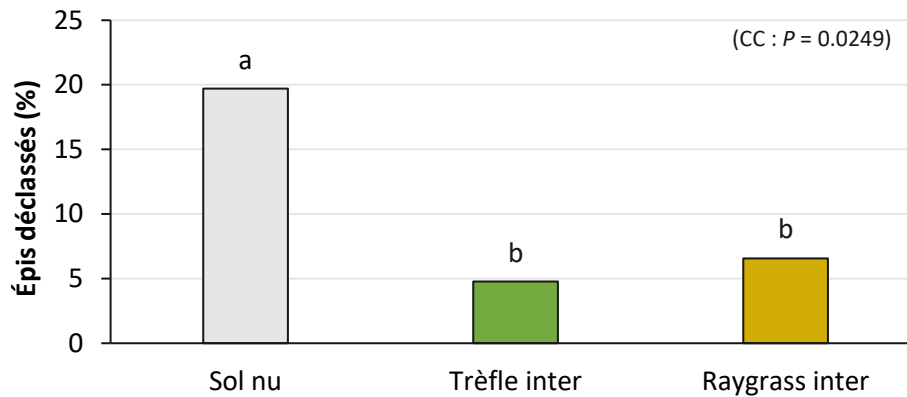


Figure 26. Taux d'épis déclassés (%) à la récolte du maïs sucré (12 septembre 2022) dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.



Figure 27. Évaluation de la qualité des grains après la récolte (12 septembre 2022), pour six épis vendables par parcelles, dans le dispositif tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC).

4.4.2.5 Risques de pollution diffuse en nitrate

À la fin de saison de croissance 2021, tel qu'observé pour le dispositif hâtif (voir section 4.4.1.5), moins de nitrate résiduel était présent dans la couche 0-30 cm des sols avec CC (prairie) (Figure 28a). La concentration globale était faible, mais la différence était significative. La concentration en N-NO_3 dans le Sol nu était 11x plus élevée avec $2,1 \text{ mg kg}^{-1}$ comparativement à $0,19 \text{ mg kg}^{-1}$ de sol avec la prairie. À la fin de 2022, les concentrations en N-NO_3 résiduel étaient encore faibles ($< 2 \text{ mg kg}^{-1}$) et il n'y avait pas de différence significative entre les traitements. Ainsi, les prélèvements de N par la culture principale et les CC intercalaires semblent avoir capté la hausse du N disponible (nitrate) dans les sols à la suite de l'incorporation de la prairie en juin 2022 dans les parcelles avec CC (Figure 28b), menant à des concentrations en nitrate comparables au Sol nu à la fin de la saison.

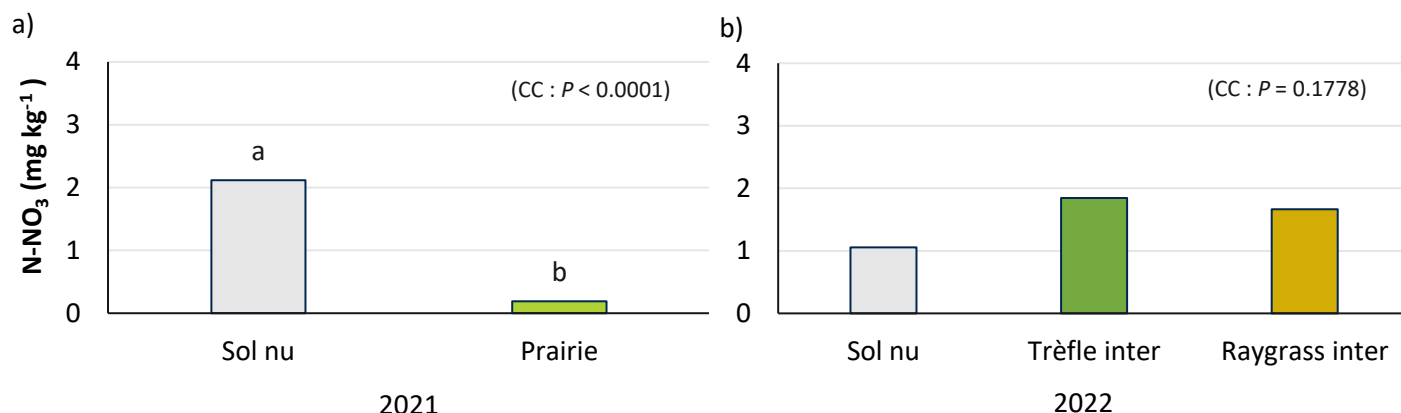


Figure 28. Concentration en nitrate (N-NO₃) résiduel du sol du dispositif tardif en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), à la fin de la saison de croissance le 15 octobre 2021 (a) et le 17 octobre 2022 (b). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.5 IMPACTS DU PAILLIS FAUCHÉ-RÉCOLTÉ ET ARRIÈRE-EFFET DES CULTURES DE COUVERTURE

L'arrière-effet des cultures de couverture (CC) de 2021 (Prairie) et de 2022 (Trèfle inter et Raygrass inter) a été évalué uniquement dans le dispositif tardif, à partir des rendements en brocolis. Par ailleurs, les biomasses aériennes des prairies, intercalaire et post-récolte, testées dans le dispositif hâtif, ont été utilisées comme source de paillis fauché-récolté dans les brocolis. Cette approche a permis de comparer l'intérêt de cette pratique, combinée aux CC des années précédentes, à celui d'un sol laissé à nu pendant trois ans (Sol nu) et fertilisé uniquement en engrais minéral.

Les apports en azote associés au paillis, ainsi que son impact sur l'humidité du sol, sont présentés à la section 4.5.1. Les effets de la rotation sur la pression des mauvaises herbes et sur les rendements en brocolis sont détaillés aux sections 4.5.2 et 4.5.3.

4.5.1 Caractérisation et impacts du paillis fauché-récolté

4.5.1.1 Contenus en éléments fertilisants

L'analyse de la biomasse composite provenant du mélange des biomasses de la Prairie post et de la Prairie inter (Tableau 6), est présentée au Tableau 10. Une quantité équivalente à 9,3 t ha⁻¹ de cette biomasse sèche (27 t ha⁻¹ base humide) a été appliquée dans les entre-rangs de brocolis recevant le fauché-récolté (Figure 29). Pour apporter une épaisseur de 6 cm de paillis sur 1 ha d'entre-rangs de brocolis, il faudrait donc l'équivalent de 2 ha de biomasse aérienne de prairie. Cela s'est traduit par des apports de 3,8 t ha⁻¹ de C_{total} facilement dégradable (C_{soluble} = 55 %) et 158 kg N_{total} ha⁻¹ (Tableau 10). En termes de N_{dispo} estimé, cela représentait 55 kg N_{dispo} ha⁻¹. Toutefois, comme la biomasse n'a pas été incorporée (laissée en surface), les apports pour les brocolis ont probablement été nettement inférieurs à cet estimé. Dans une méta-analyse, sous climat tempéré, Chahal et Van Eerd (2023) ont rapporté en effet que l'incorporation des CC permettait d'accroître les rendements de la culture subséquente de 15 %, comparativement à laisser les résidus en surface. Par la suite, le paillis s'est dégradé tranquillement, sur la saison. La biomasse verte a desséché en 3 semaines environ, de sorte qu'ensuite, la paille jaunée des graminées constituait la majorité des résidus (Figure 30).

Tableau 10. Caractéristiques de la biomasse (base sèche (b.s.)) du mélange provenant de la prairie intercalaire et de la prairie post-récolte produite dans le dispositif hâtif (contenus en azote (N), C_{soluble}, C/N et indice de stabilité biologique (ISB)), ainsi que les prélèvements en éléments totaux (C, N et estimé en N disponible) et caractéristiques de la biomasse de fauché-récolté apportée comme paillis dans les entre-rangs de brocolis du dispositif tardif (13 juin 2023).

Paramètres b.s.	2023	
	Fauché-récolté (Biomasse Prairie inter + Prairie post fauchée)	Biomasse de fauché-récolté apportée comme paillis dans les entre-rangs de brocolis
Biomasse (kg ha ⁻¹)	4600	9300
N (%)	1,7	1,7
C/N	24	24
ISB (%)	14	14
C total (kg ha ⁻¹)	1886	3813
C soluble (%)	55	55
N total (kg ha ⁻¹)	78	158
N disponible (kg ha ⁻¹)*	27	55

*Estimé selon la méthode Jobin et Douville 1996



Figure 29. Fauche, application et épaisseur du paillis appliqué dans les entres-rangs de brocolis du dispositif tardif (13 juin 2023).



Figure 30. Évolution de la dégradation du paillis de prairie fauché-récolté une semaine après son application (20 juin 2023), jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).

4.5.1.2 Effets sur l'humidité du sol

Le paillis, de même que la présence de CC (Prairie + Raygrass inter) lors des années précédentes, a influencé la teneur en eau du sol de l'étude, de type très drainant, tout au long de la période de croissance des brocolis. À 5 cm de profondeur, soit près de la surface, la teneur en eau est demeurée plus importante, surtout après quelques jours sans pluie, lorsque le paillis était présent (24 au 28 juin, Figure 31). Cette période correspondait aux 2 semaines suivant l'ajout du paillis. Par la suite, alors que le paillis poursuivait sa dégradation et pendant tout le reste de la saison de croissance, l'humidité du sol à 5 cm de profondeur était très similaire avec ou sans paillis, mais généralement plus humide avec précédent de CC, alors que le Sol nu tendait à demeurer plus sec et ce, pendant toute la durée des suivis. Ce résultat très intéressant démontre que même si le sol n'était pas couvert d'un paillis en 2023, l'arrière-effet des CC de 2021 (Prairie) et de 2022 (Raygrass inter) tendait à favoriser une meilleure rétention en eau du sol 1 à 2 ans plus tard. Ceci peut s'expliquer par une plus grande quantité de matière végétale (racines, végétaux) incorporée dans le sol ou par davantage de canaux racinaires contribuant à la microporosité du sol, ce qui améliore l'infiltration de l'eau (Yan et Arthur, 2025). Cette différence se remarque aussi en profondeur, à 15 cm (Figure 32). Les sols, avec ou sans paillis, mais avec précédents de CC, apparaissent plus humides que le Sol nu tout au long du suivi. Il convient néanmoins de rester prudent dans les interprétations car certaines observations pourraient être dues au hasard (effet localisé dû à l'emplacement des sondes) étant donné que seules deux répétitions ont pu être équipées avec les sondes de suivi d'humidité. D'autres suivis s'avèrent donc nécessaires pour confirmer ces observations.

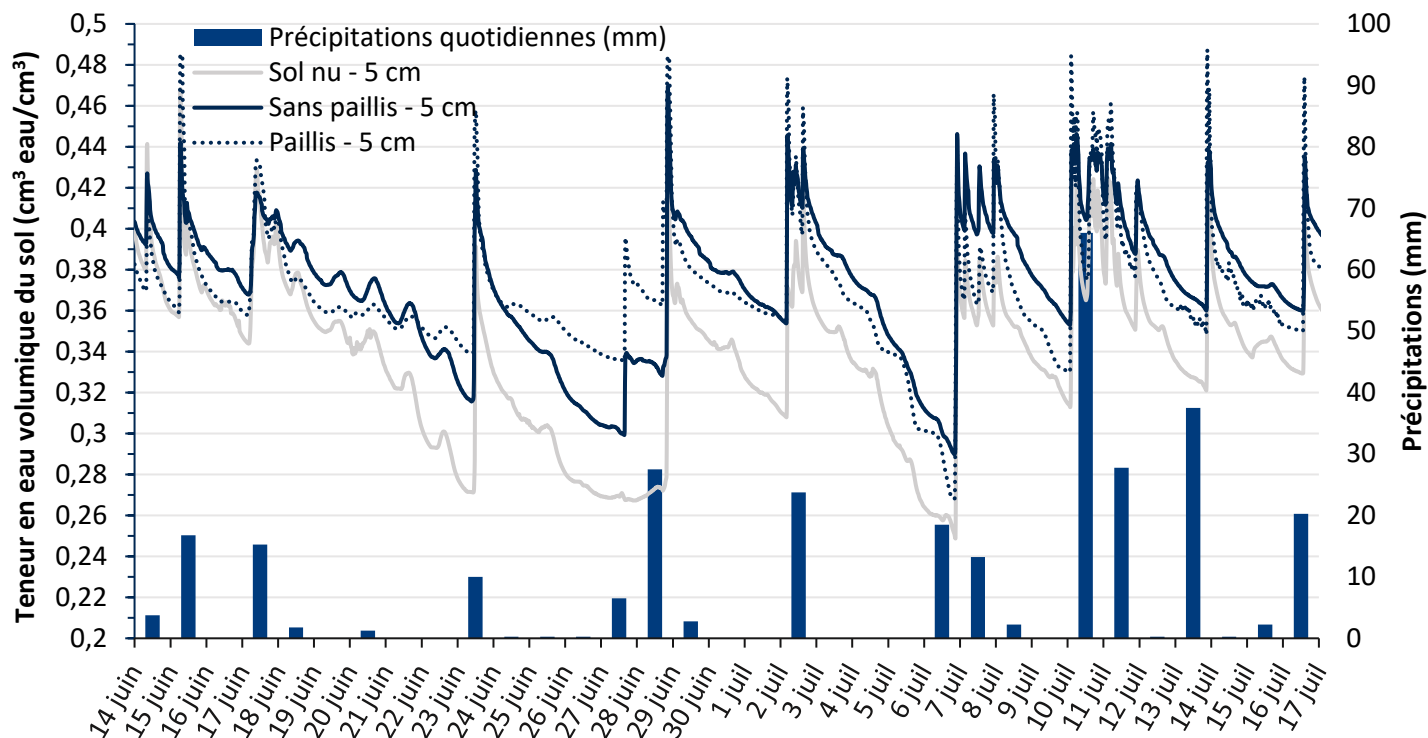


Figure 31. Teneurs en eau du sol à 5 cm de profondeur en fonction des traitements (Sol nu, Raygrass inter + paillis et Raygrass inter sans paillis) et des précipitations, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).

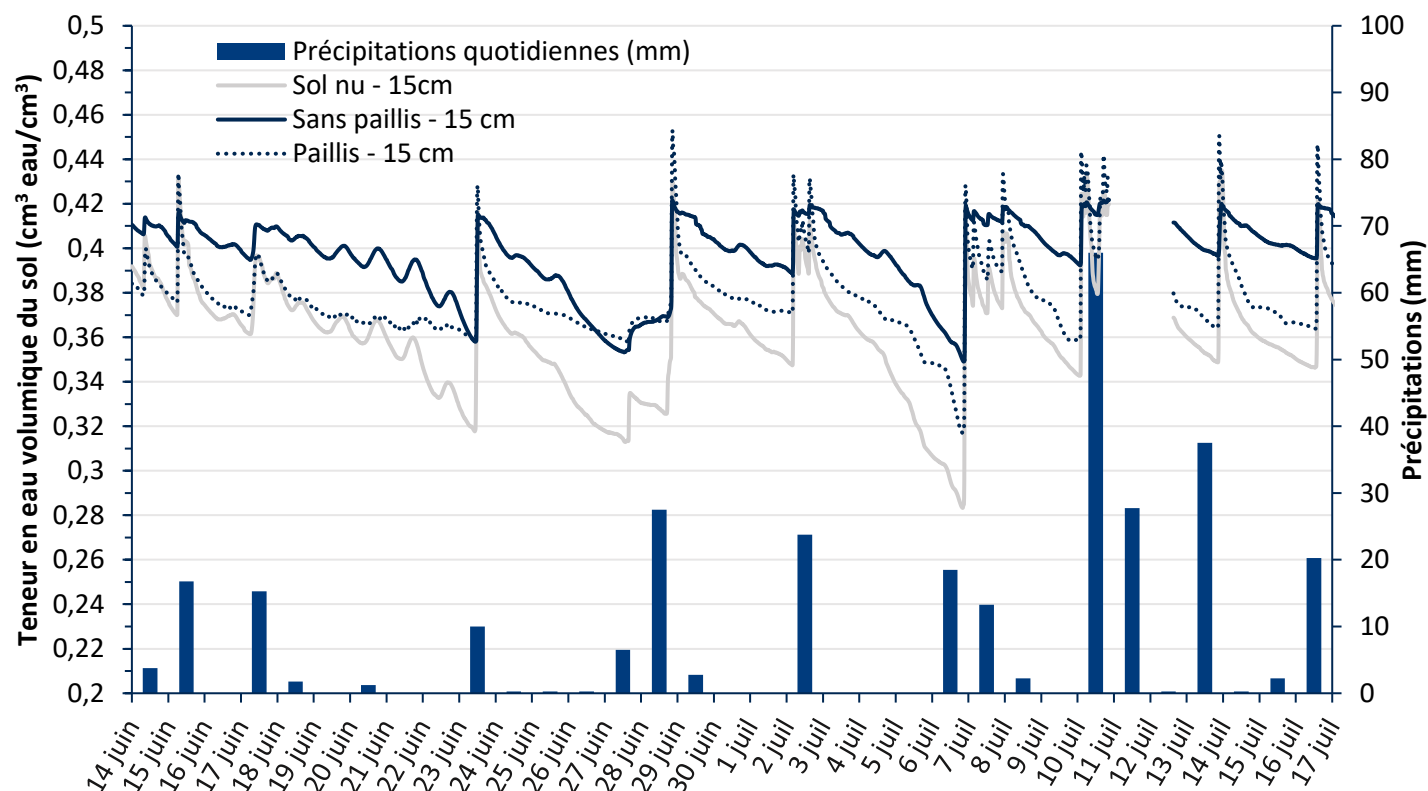


Figure 32. Teneurs en eau du sol à 15 cm de profondeur en fonction des traitements (Sol nu, Raygrass inter + paillis et Raygrass inter sans paillis) et des précipitations, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu'à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).

4.5.2 Impacts de la rotation sur le contrôle des mauvaises herbes

Les Figure 33 et Figure 34 présentent les couverts moyens en mauvaises herbes (MH) en fonction des différents traitements à la récolte des brocolis. Cette culture avait été sarclée 2 fois avant l'ajout du paillis le 13 juin. Malgré cela, la pression de MH s'est accrue pour atteindre 14-18 % du couvert, pour tous les traitements sans paillis, contre seulement 3 % en présence de paillis ($P = 0.0059$), soit un net avantage du paillis sur le contrôle des MH. En l'absence de paillis, les précédents de CC n'ont pas permis de réduire la pression des MH, contrairement à ce qui est souvent rapporté dans la littérature (Fernando et Shrestha, 2023). Une CC en croissance active entre généralement en compétition pour les ressources, ce qui peut réduire la biomasse des MH et la banque de semences l'année suivante. Cependant, l'efficacité des CC dans la suppression des MH varie considérablement selon plusieurs facteurs : l'espèce utilisée, la composition du mélange (les mélanges étant généralement plus efficaces que les espèces pures), la date de semis, la densité et la biomasse produite, le moment de la destruction de la CC, ainsi que la culture principale suivante. Dans le cadre du présent essai, il est aussi probable que l'effet du précédent de CC n'ait pas été détectable sur la pression des MH, puisque toutes les parcelles ont bénéficié de deux sarclages en début de saison, maintenant ainsi la pression des MH sous la barre des 18 %.

Enfin, la pression des MH observée dans l'ensemble des traitements n'a pas constitué une contrainte significative à la croissance des brocolis. Celle-ci était déjà bien avancée après les sarclages, ce qui a limité la compétition ultérieure des MH (Figure 34).

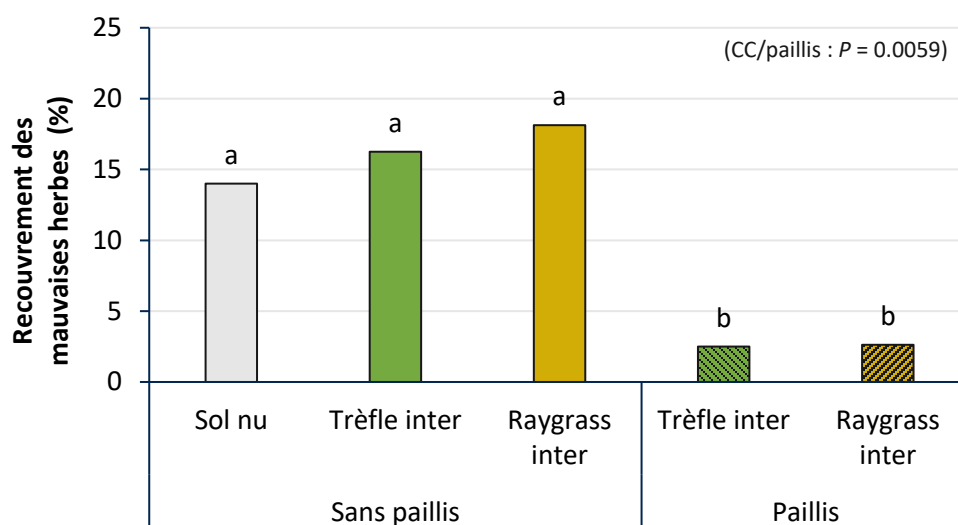


Figure 33. Recouvrement des mauvaises herbes (%) en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, à la récolte des brocolis (17 juillet 2023). Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

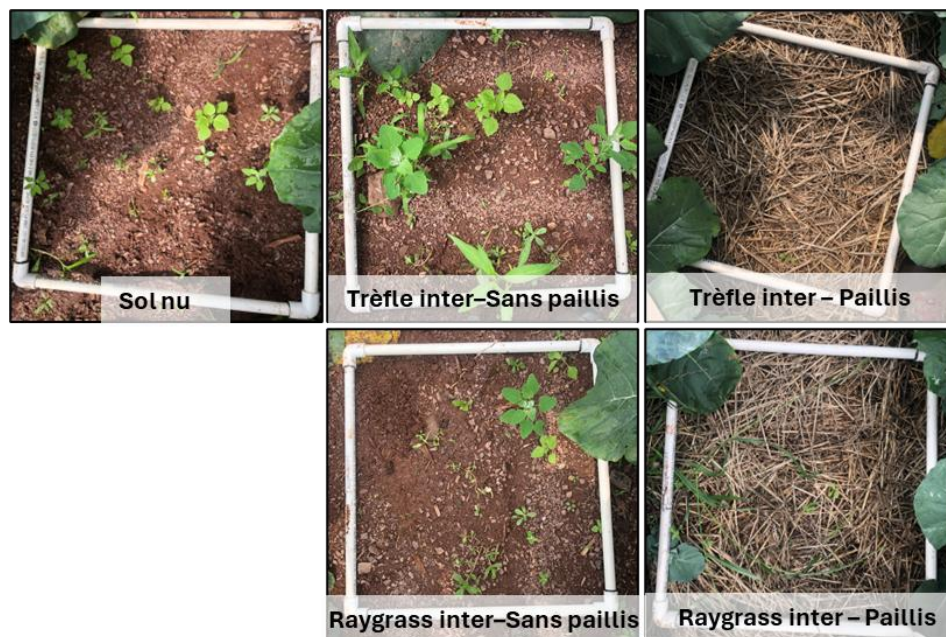


Figure 34. Recouvrement des mauvaises herbes en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, à la récolte des brocolis (17 juillet 2023).

4.5.3 Impacts de la rotation sur les rendements en brocolis

Les précédents de CC et l'application de paillis ont eu des effets significatifs sur les rendements en brocolis (Figure 35, CC/paillis : $P = 0.0119$). Parmi tous les traitements, celui combinant des précédents de CC (Prairie et Trèfle inter) avec du paillis en 2023 a généré les rendements les plus élevés, atteignant 604 g plant^{-1} , soit une valeur significative 1,12 fois supérieure à celle du traitement Sol nu (540 g plant^{-1}). En deuxième position, le traitement avec précédents de CC incluant le trèfle intercalaire, mais sans paillis, a produit des rendements de 585 g plant^{-1} . Toutefois, cette différence n'était pas statistiquement significative par rapport au Sol nu. Pour leur part, les traitements avec précédents de CC à base de ray-grass intercalaire, avec ou sans paillis, ont généré des rendements significativement inférieurs à ceux obtenus avec le Trèfle inter. Les rendements mesurés étaient en moyenne de 516 g plant^{-1} avec ou sans paillis et équivalents à ceux du Sol nu.

Étant donné les effets positifs du précédent de Trèfle inter sur les rendements, un résultat similaire aurait pu être observé avec le précédent de Raygrass inter. La baisse observée avec le Raygrass inter pourrait toutefois s'expliquer par une disponibilité en azote (N) plus faible dans le sol après l'incorporation du ray-grass comparativement au trèfle. En effet, selon les teneurs en N de la biomasse des CC, le trèfle aurait fourni environ $27 \text{ kg N}_{\text{dispo}} \text{ ha}^{-1}$ à la culture suivante, ici le brocoli, alors que le ray-grass n'apportait aucun N disponible (Tableau 8). Dans un contexte de fertilisation réduite (85 % de la dose recommandée), le traitement Trèfle inter a donc bénéficié d'un apport supplémentaire en N disponible. Contrairement au trèfle, le ray-grass, qui n'est pas une légumineuse, ne fixe pas l'azote atmosphérique et aurait plutôt puisé dans les réserves du sol pour sa croissance, sans en restituer à la culture suivante. De plus, une reprise inattendue du ray-grass a été observée au printemps 2023, avant le travail du sol et la plantation des brocolis (Figure 37). Cette espèce annuelle a ainsi démontré une rusticité suffisante pour survivre à l'hiver, et il est possible qu'elle ait prélevé de l'eau et des nutriments au détriment du brocoli juste avant la plantation.

Des mesures additionnelles réalisées pendant l'essai semblent appuyer cette hypothèse. En effet, dans le cadre d'un stage professionnel en agronomie (Rapport de stage professionnel, Leblanc 2023 (UlaVal, non publié)), des membranes d'échange ionique (MEI) ont été insérées dans la couche utile du sol (0-20 cm) des parcelles de brocolis ayant comme précédent le ray-grass, avec ou sans paillis, ainsi que dans une parcelle du traitement Sol nu. Cet outil a permis de suivre en continu l'intensité de la disponibilité du nitrate (N-NO_3) *in situ* dans la solution du sol, depuis l'application du paillis jusqu'à la récolte des brocolis. Parallèlement, des échantillons de sol ont été prélevés afin de mesurer ponctuellement la concentration en N-NO_3 , ce qui a permis de valider les observations obtenues avec les MEI. Ces résultats, présentés à l'Annexe A, montrent que la

présence du paillis n'a pas affecté la disponibilité du N dans le sol. En revanche, le précédent de CC incluant la prairie et le ray-grass (traitement Raygrass inter) présentait une disponibilité en N plus faible durant la période allant du 28 juin au 12 juillet 2023, soit deux semaines après l'application du paillis, comparativement au Sol nu (**Figure 44** et **Figure 45**). En détail, les parcelles Sol nu présentaient des intensités en N-NO₃ deux fois plus importantes à ce moment et des concentrations en N-NO₃ évalués à 15 mg kg⁻¹ de sol contre 10 et 5 mg kg⁻¹ dans les traitements Raygrass inter sans paillis ou avec paillis, respectivement. Ce suivi n'étant pas prévu dans le cadre de cette étude, seules les parcelles avec précédent de ray-grass ont été évaluées durant le stage.

Par ailleurs, la concentration en N-NO₃ du sol a été analysée dans tous les traitements le 27 juin 2023, soit deux semaines après l'application du paillis, et est présentée à la Figure 38. Une tendance marquée (CC/paillis : $P = 0.0748$) indique que le traitement Trèfle inter (particulièrement sans paillis) présentait une plus grande disponibilité en nitrate que le traitement Raygrass inter (avec ou sans paillis). Ces résultats suggèrent que les rendements en brocolis ont été plus faibles avec le précédent de ray-grass, probablement en raison d'une moins grande disponibilité en N dans le sol.

De plus, cette tendance (CC/paillis : $P = 0.0748$) montrait que le sol du traitement avec précédent de trèfle + paillis présentait une concentration en N-NO₃ deux fois moins élevée que celle avec trèfle mais sans paillis. Cela laisse penser qu'à deux semaines après son application, le paillis pourrait avoir provoqué un léger effet immobilisant du N, mais qui était toutefois transitoire et sans impact négatif sur la croissance des brocolis, dont les rendements ont été les plus élevés avec ce traitement Trèfle inter + paillis.

Ces résultats amènent à s'interroger sur la pertinence du ray-grass comme culture de couverture (CC). Dans un contexte de fertilisation azotée limitée, les légumineuses sont avantagées par rapport aux graminées pour enrichir le sol en azote disponible. Du point de vue de la santé des sols, le ray-grass reste néanmoins intéressant en raison de son système racinaire dense et fasciculé, qui favorise l'agrégation du sol et l'apport de matière organique. De plus, il est également souvent utilisé comme culture piège à nitrate dans les sols sur-fertilisés et sensibles au lessivage, justement grâce à son système racinaire (Thomsen et Hansen, 2014).

Ainsi, bien que le ray-grass ne soit pas à exclure comme CC, la régie de fertilisation doit tenir compte du fait qu'il ne constitue pas une source concrète de N pour les cultures suivantes. Il n'est donc pas avantageux de réduire la fertilisation azotée en misant uniquement sur cette CC.

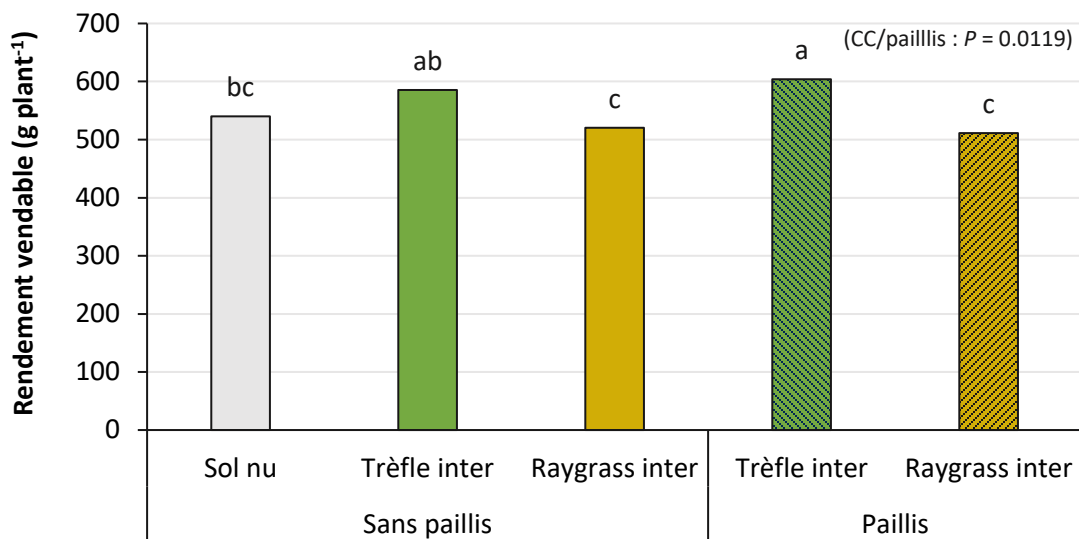


Figure 35. Rendements en brocolis en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, lors de la récolte dans le dispositif tardif (17 juillet 2023).
Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.



Figure 36. Aperçu du champ de l'essai en brocolis pendant la croissance et à la récolte, dans le dispositif tardif en 2023.



Figure 37. Reprise du ray-grass annuel dans le dispositif tardif avant la plantation des brocolis, le 9 mai 2023.

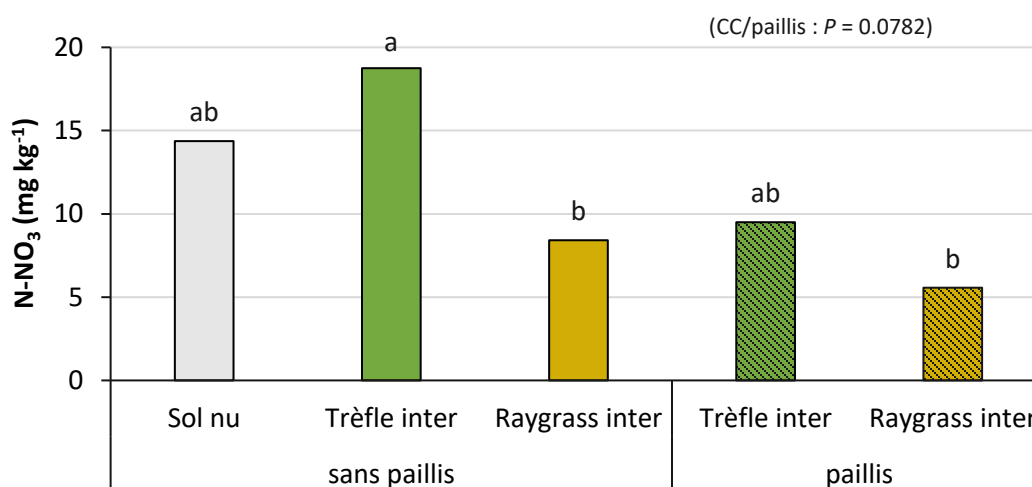


Figure 38. Concentration en N-NO₃ du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, 2 semaines après l'application du paillis fauché-récolté dans les brocolis. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.6 ÉVOLUTION DE LA SANTÉ GLOBALE DES SOLS PENDANT LES ROTATIONS

Au début du projet, en 2021, la cote de santé globale du sol évaluée selon l'analyse inspirée du test de Cornell était faible, soit 34/100 dans le dispositif hâtif (Tableau 11) et 31/100 dans le dispositif tardif (Tableau 12). Ces résultats confirmaient que le site d'étude présentait un sol nécessitant des correctifs, une condition essentielle pour pouvoir détecter des améliorations à la suite de l'introduction des CC. Trois ans plus tard, une nouvelle évaluation de la santé globale n'a toutefois révélé aucune amélioration significative sur la base des paramètres inclus dans le test de santé globale. Comparativement au Sol nu, l'inclusion des CC, dans les deux rotations (hâtive et tardive), n'a pas permis d'améliorer concrètement les cotes physiques, biologiques ou chimiques du sol. Les résultats sont demeurés inchangés, et les mêmes correctifs restent donc nécessaires. De plus, dans le dispositif tardif, la cote physique, bien que déjà faible, apparaît s'être encore dégradée, passant de 17/100 en début de projet à une moyenne de 8/100 à la fin. Plusieurs facteurs pourraient expliquer l'absence d'amélioration. D'abord, le sol présente des contraintes pédologiques innées, difficilement corrigeables, comme le montre le profil pédologique (voir section 4.2) : un pourcentage élevé de graviers le rend difficile à structurer, très drainant et

sensible à la compaction. Ainsi, même l'ajout de correctifs comme les CC n'a pas permis de surmonter ces limitations en trois ans. Selon la pédologue C. Bossé, responsable de l'évaluation pédologique, il s'agit d'un type de sol où les pratiques de conservation peuvent au mieux prévenir la dégradation, mais dont le potentiel d'amélioration reste limité (comm. personnelle).

Il est également important de considérer que, durant les trois années de fraisière précédant la rotation, le sol n'a pas été perturbé. En revanche, la rotation à l'étude impliquait des cultures annuelles avec un travail du sol répété chaque année, particulièrement dans le dispositif tardif, dont l'étude s'est terminée par une culture de brocolis sarclée à plusieurs reprises. À l'inverse, l'étude du dispositif hâtif s'est terminée au moment de la fauche des prairies, avant le travail du sol. La baisse de la cote physique dans le dispositif tardif pourrait donc s'expliquer par cette plus grande intensité de travail du sol. Dans un sol aussi sensible à la dégradation, l'inclusion des CC n'a donc pas suffi à compenser les effets du travail mécanique.

Pour améliorer la santé de ce sol, il serait pertinent de combiner la réduction du travail du sol avec l'ajout d'amendements structurants, en complément des CC. Le choix de ces amendements peut néanmoins être compliqué étant donné qu'ils sont souvent riches en P et que plusieurs sols maraîchers sont déjà saturés. Il faut aussi garder en tête que l'amélioration de l'agrégation, du taux de matière organique (MO) et de la santé globale du sol se produit lentement, souvent sur une période excédant trois ans (Samson et coll., 2023). Il faut donc prendre en compte que le délai de l'étude n'a pas permis de capter les effets cumulatifs pouvant découler des inclusions répétées de CC.

Par exemple, Bourgeois et coll. (2022) ont observé un effet cumulatif des CC sur les rendements du maïs : après un an, les gains étaient de 10 %, mais après 2 à 5 ans d'inclusion répétée, les gains atteignaient 25 %. À la ferme expérimentale de l'IRDA en Chaudière-Appalaches, un dispositif longue durée a montré qu'un apport récurrent de fumier (30 ans) dans une rotation de grandes cultures (texture loam-argileux) permettait une hausse de 10 points de la cote de santé globale du sol, comparativement à un apport d'engrais uniquement minéral. Lorsque cet apport de fumier était combiné à l'inclusion de prairies (2 ans sur 4), la hausse atteignait 20 points (Landry et coll., 2024b). La combinaison de stratégies (apport d'amendements organiques et CC vivaces) à moyen et long terme a donc la capacité d'améliorer la santé globale des sols. Ainsi, ces bonnes pratiques devraient être combinées en plus de réfléchir à la réduction du travail de sol et ce sur le long terme, surtout dans un sol sensible à la dégradation comme dans cette étude.

Les sections 4.6.1 et 4.6.2 présentent de façon exhaustive les résultats de l'analyse de santé globale du sol et se concentrent sur l'interprétation des différences entre les traitements en comparant les valeurs brutes des paramètres du test, plutôt que les cotes attribuées à ces paramètres.

4.6.1 Sol du dispositif hâtif de 2021 à 2023

L'effet des CC sur les paramètres de santé des sols en fin de projet a mis en évidence une seule différence statistiquement significative entre les traitements, soit au niveau du contenu en potassium (K) du sol. Celui-ci était significativement plus élevé dans le traitement Sol nu, atteignant un niveau considéré comme optimal (**Tableau 11**, CC : $P = 0.0203$). Ce résultat ne traduit pas une concrète amélioration de la santé du sol puisqu'en régie conventionnelle, des ajouts de K ont été réalisés par la fertilisation minérale. L'absence de CC dans le Sol nu a dû contribuer à maintenir une plus grande concentration en K dans le sol alors que les CC dans les autres traitements ont probablement prélevé une part du K apporté. Le seul autre paramètre qui tendait à être différent (CC : $P = 0.0834$) est la respiration microbienne, qui traduit l'intensité de l'activité microbienne du sol. Celle-ci tendait à être améliorée en présence des CC (surtout avec la Prairie post) en comparaison du Sol nu. Toutefois ces valeurs n'étaient pas supérieures à celles mesurées en début de rotation après la fraisière.

Tableau 11. Évolution de la santé globale des sols de la rotation avec maïs sucré hâtif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC), de 2021 à 2023.

Paramètres ¹	2021	2023			*Valeurs de P
	Après fraisière	Sol nu	Prairie inter	Prairie post	
	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	
Physiques					
Stabilité des agrégats (%) (.25 à 2 mm)	37,5	34,2	37,9	36,0	0.5078
Proportion d'agrégats (%) (.25 à 2mm)	40,6	41,1	37,3	40,2	0.4333
Cote physique (/100)	15	14	16	14	
Biologiques					
Respiration C-CO ₂ (ppm)	48	36 ^b	42 ^{ab}	49 ^a	0.0834
Azote labile N-NH ₃ (kg ha ⁻¹)	102	91	88	88	0.8916
Matière organique (%)	3,0	2,8	2,8	3,0	0.6877
Carbone actif (POXC) (ppm)	328	332	353	354	0.6564
Cote biologique (/100)	25	22	23	24	
Chimiques					
pH	6,2	6,6	6,5	7,0	0.1600
Phosphore (kg ha ⁻¹)	1382	1367	1322	1384	0.2654
Potassium (kg ha ⁻¹)	459	513 ^a	420 ^b	457 ^b	0.0203
Magnésium (kg ha ⁻¹)	284	304	284	299	.
Calcium (kg ha ⁻¹)	3849	4395	3919	4088	.
Cote chimique (/100)	45	52	48	49	
Cote globale (/100)	34	36	37	37	0.7962

¹Les couleurs indiquent le niveau de classement de chaque paramètre selon la notation du test de santé globale de AgroEnviroLab, du moins bon niveau au meilleur (rouge : cote entre 0 et 30 %, jaune : cote entre 31 et 70 %, vert : cote entre 71 et 100 %).

*Valeurs de P pour la comparaison des traitements de 2023 seulement. Les lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.6.1.1 Indicateurs complémentaires de l'état biologique des sols du dispositif hâtif de 2021 à 2023

En complément de l'analyse de santé globale des sols du laboratoire AEL, des paramètres de l'activité biologique du sol ont été caractérisés au cours de la rotation dans le dispositif hâtif. Le C organique soluble (C_{eau}), qui constitue la principale source de nutriments pour les microorganismes du sol, a montré une augmentation en 2022 dans l'ensemble des traitements à la suite de l'incorporation de la fraisière, comparativement aux niveaux observés en début de projet (2021) (Figure 39).

Le travail de sol après la fraisière peut avoir contribué à retourner du carbone labile (i.e C_{eau}) au sol par l'incorporation des résidus végétaux. Toutefois, en fin de saison de la troisième année, les concentrations de C_{eau} ont été les plus faibles enregistrées depuis le début du projet. Malgré cela, l'inclusion de CC tendait à maintenir les niveaux de C_{eau} légèrement plus élevés ($P = 0.1015$), avec une moyenne de 77 mg kg⁻¹ dans les traitements avec CC, comparativement à 67 mg kg⁻¹ dans le Sol nu (Figure 39).

Un second paramètre évalué était le pouvoir de minéralisation du sol (libération de N-NO₃), indicateur de son potentiel à fournir de l'azote par minéralisation de la MO sous l'action des microorganismes. En début de projet, cette capacité était évaluée comme nulle. Toutefois, après le travail du sol, une augmentation de la capacité de libération de N-NO₃ a été observée dans tous les traitements au stade soies du maïs, indépendamment de la présence ou non de CC, bien que les différences entre traitements n'étaient pas statistiquement significatives (Figure 40). En fin de rotation, la capacité de

fourniture en azote était globalement plus faible qu’au stade soies du maïs l’année précédente. Néanmoins, le traitement combinant un précédent avoine-pois et une Prairie inter présentait une capacité significativement plus élevée à libérer du N-NO₃ que le Sol nu ou le traitement Prairie Post (Figure 40, Prairie inter : 3,5 mg N-NO₃ kg⁻¹ vs. Sol nu : 1,7 mg N-NO₃ kg⁻¹). Cette différence peut être attribuée à la composition plus riche en légumineuses de la Prairie inter, comparativement à celle de la Prairie Post, favorisant ainsi une meilleure fourniture en azote par fixation symbiotique et minéralisation.

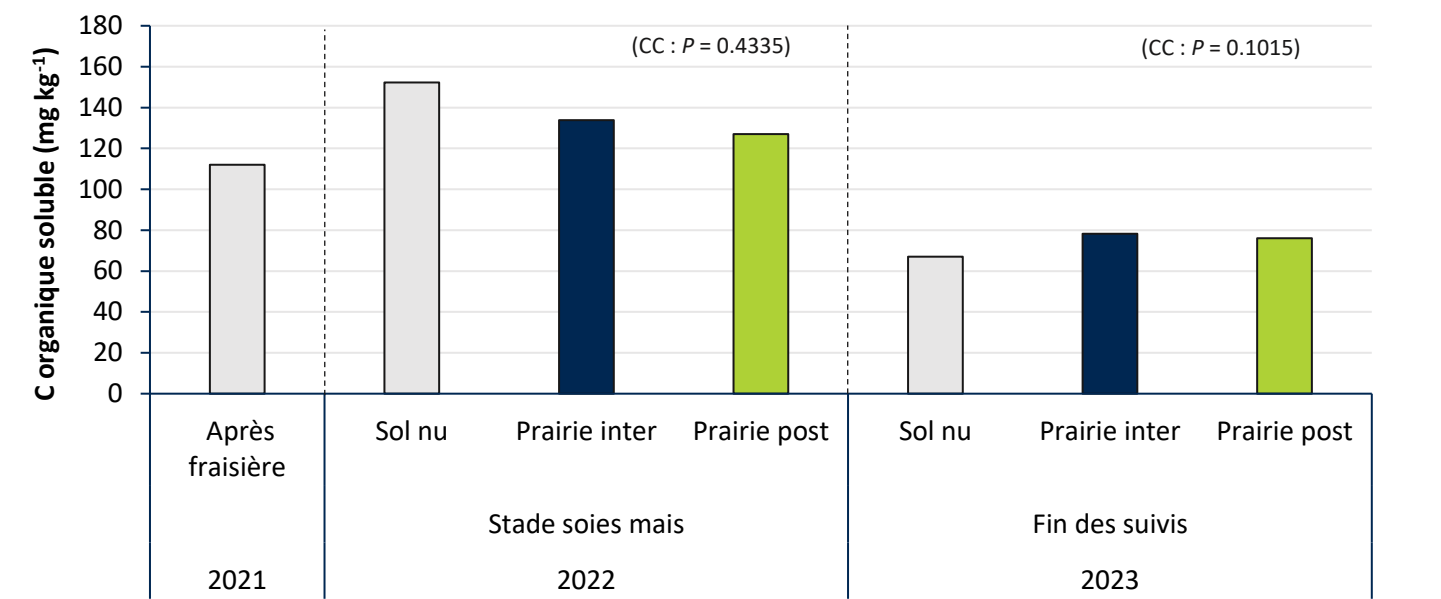


Figure 39. Concentration en carbone organique soluble (C_{eau}) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (22 juillet 2022) et à la fin des suivis (17 juillet 2023), dans le dispositif hâtif. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de P < 0.05.

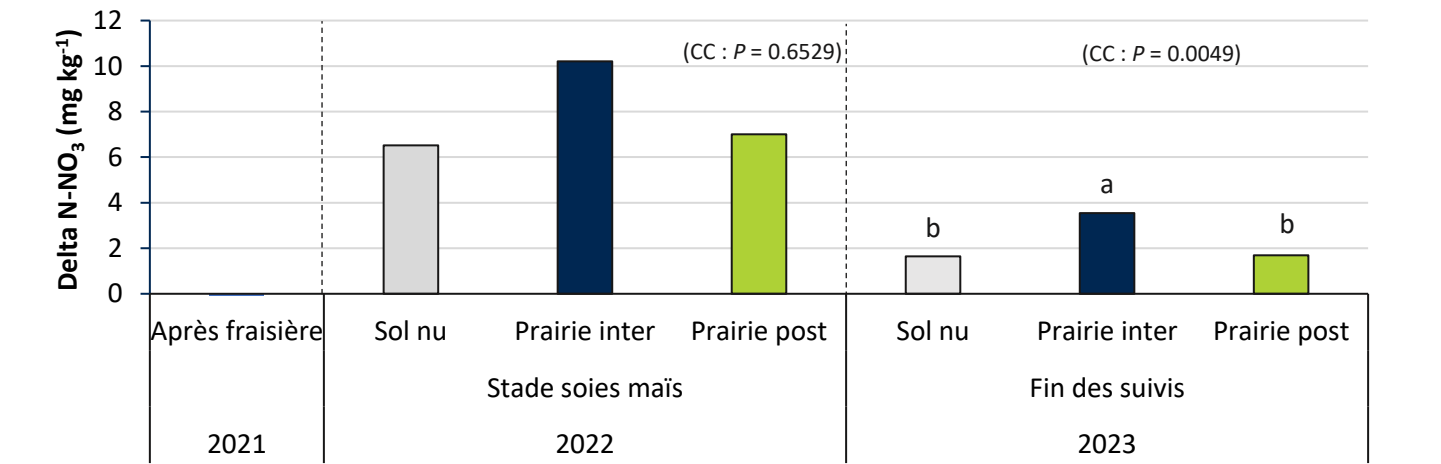


Figure 40. Potentiel de fourniture en nitrate (N-NO₃) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (22 juillet 2022) et à la fin des suivis (17 juillet 2023), dans le dispositif hâtif. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de P < 0.05.

4.6.2 Sol du dispositif tardif de 2021 à 2023

Comme dans le dispositif hâtif, l'analyse de chaque paramètre issu de l'évaluation de la santé globale du sol n'a révélé qu'une seule différence statistiquement significative entre les traitements, soit au niveau du contenu en K. Les concentrations de K étaient plus élevées dans tous les traitements, à l'exception du Raygrass inter sans paillis (**Tableau 12**). Toutefois, ces différences demeuraient peu marquées et, comme discuté précédemment, elles ne traduisent pas une amélioration concrète de la santé du sol. En effet, dans le cadre de la régie conventionnelle, des apports de K minéral ont été réalisés, ce qui limite l'interprétation de ces résultats. L'absence de CC dans le traitement Sol nu a probablement contribué au maintien d'une concentration plus élevée de K dans le sol, tandis que les CC présentes dans les autres traitements ont vraisemblablement absorbé une partie du K disponible. Par ailleurs, les traitements incluant un paillis, surtout avec précédent de ray-grass, ont favorisé un apport supplémentaire de K au sol, probablement par la décomposition de la biomasse du paillis.

Comme dans le dispositif hâtif, le seul indicateur biologique de la santé du sol ayant montré une tendance différente entre les traitements est la respiration microbienne ($P = 0.0765$). Celle-ci tendait à être plus élevée en présence de CC, particulièrement lorsque celles-ci étaient combinées à un paillis, comparativement au Sol nu. Cette tendance suggère une stimulation de l'activité microbienne par les résidus végétaux. Néanmoins, les valeurs mesurées en fin de rotation ne dépassaient pas celles observées en début de projet, après la culture de fraises, ce qui limite la portée de cette amélioration.

Tableau 12. Évolution de la santé globale des sols de la rotation avec maïs sucré tardif, en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté, de 2021 à 2023.

Fauché-récolté	2021		2023				Valeurs de P*
	Après fraisière	Sol nu	Trèfle inter		Raygrass inter		
			Sans paillis	Paillis	Sans paillis	Paillis	
Paramètres	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	
Physiques							
Stabilité des agrégats (%) (.25 à 2 mm)	39,3	23,3	26,3	26,1	27,4	25,2	0.3873
Proportion d'agrégats (%) (.25 à 2mm)	44,0	38,7	38,7	38,0	37,8	38,3	0.9788
Cote physique (/100)	17	6	8	8	9		
Biologiques							
Respiration C-CO2 (ppm)	40	30,1 c	35 abc	42 ab	31 bc	47 a	0.0765
Azote labile N-NH3 (kg ha-1)	114	106	120	105	104	129	0.3009
Matière organique (%)	3,3	2,6	2,7	2,4	2,7	2,6	0.8067
Carbone actif (POXC) (ppm)	295	295	343	306	308	361	0.1911
Cote biologique (/100)	26	19	21	20	20	22	
Chimiques							
pH	6,0	6,4	6,2	6,2	6,3	6,3	0.2052
Phosphore (kg ha-1)	1270	1249	1237	1232	1198	1234	0.8871
Potassium (kg ha-1)	446	475 bc	477 bc	546 ab	439 c	587 a	0.0161
Magnésium (kg ha-1)	297	316	329	319	302	339	.
Calcium (kg ha-1)	3604	3822	3619	3703	3580	3786	.
Cote chimique (/100)	42	48	47	49	46	51	
Cote globale (/100)	32	31	32	32	32	34	0.4019

¹Les couleurs indiquent le niveau de classement de chaque paramètre selon la notation du test de santé globale de AgroEnviroLab, du moins bon niveau au meilleur (rouge : cote entre 0 et 30 %, jaune : cote entre 31 et 70 %, vert : cote entre 71 et 100 %).

*Valeurs de P pour la comparaison des traitements de 2023 seulement. Les lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

4.6.2.1 Indicateurs complémentaires de l'état biologique des sols du dispositif tardif de 2021 à 2023

En complément de l'analyse de santé globale, des paramètres de l'activité biologique du sol ont été caractérisés au cours de la rotation dans le dispositif tardif. Le C organique soluble (C_{eau}), la source principale de nutriments des microorganismes du sol, est demeuré stable après l'incorporation de la fraisière et de la prairie, lorsqu'il a été mesuré au stade soies du maïs en 2022. Ce résultat contraste avec les observations faites dans le dispositif hâtif (voir section 4.6.1.1). À la fin de la troisième saison, les concentrations en C_{eau} étaient comparables voire légèrement inférieures à celles en début du projet (Figure 41) et de légères différences ont été observées en fonction des traitements (CC/paillis : $P = 0.0035$). La présence de paillis, combinée à un précédent de CC, le trèfle ou le ray-grass, a favorisé une augmentation du C_{eau} par rapport au Sol nu (Sol nu : $60 \text{ mg } C_{\text{eau}} \text{ kg}^{-1}$, autres : $66\text{-}76 \text{ mg } C_{\text{eau}} \text{ kg}^{-1}$). Le Raygrass inter, même sans paillis, a permis une hausse significative du C_{eau} en comparaison du Sol nu. Pour le trèfle, cette hausse s'est avérée significative seulement en présence de paillis (Figure 41). Ainsi, le ray-grass pourrait être une meilleure source de carbone labile que le trèfle, qui a plutôt contribué à améliorer la capacité du sol à fournir du nitrate (N-NO_3). En effet, au début du projet, cette capacité était jugée nulle. Par la suite, de manière générale, la libération de N-NO_3 a augmenté dans tous les traitements au stade soies du maïs, avec ou sans CC. Toutefois, à ce stade, le sol avec Trèfle inter avait une capacité de libération de N-NO_3 1,6x plus importante que le traitement avec Raygrass inter et 2x plus importante que le Sol nu (Figure 42, CC : $P = 0.0005$).

En fin de rotation, la capacité de fourniture en N du sol était plus faible qu'au stade soies du maïs de l'année précédente pour tous les traitements en absence de paillis. En présence de paillis toutefois, la capacité du sol à fournir du N-NO_3 avait tendance à être supérieure au Sol nu et similaire aux valeurs de l'année précédente (Figure 42, CC/paillis : $P = 0.0960$, Sol nu : $1,1 \text{ mg } \text{N-NO}_3 \text{ kg}^{-1}$, Raygrass inter + paillis : $3,8 \text{ mg } \text{N-NO}_3 \text{ kg}^{-1}$ et Trèfle inter + paillis : $4,5 \text{ mg } \text{N-NO}_3 \text{ kg}^{-1}$). Tel qu'envisagé, l'ajout de paillis peut donc être une source d'azote disponible pour le sol.

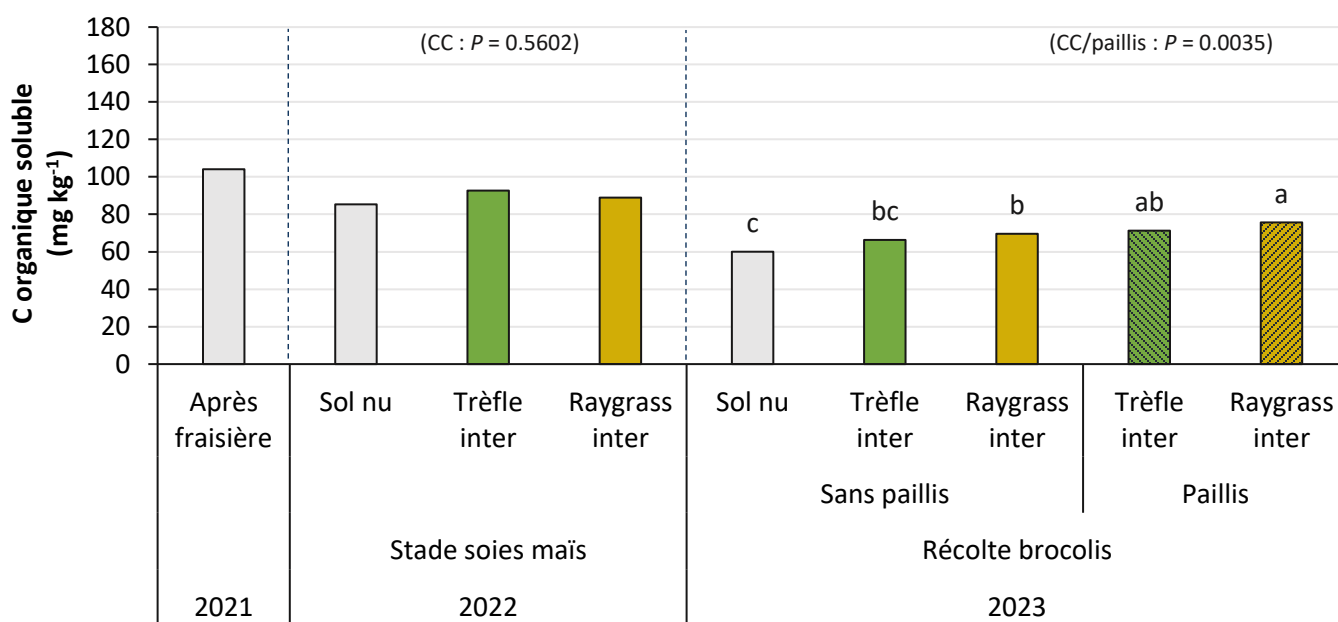


Figure 41. Concentration en carbone organique soluble (C_{eau}) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (17 août 2022) et à la récolte des brocolis (17 juillet 2023), dans le dispositif tardif. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.05$.

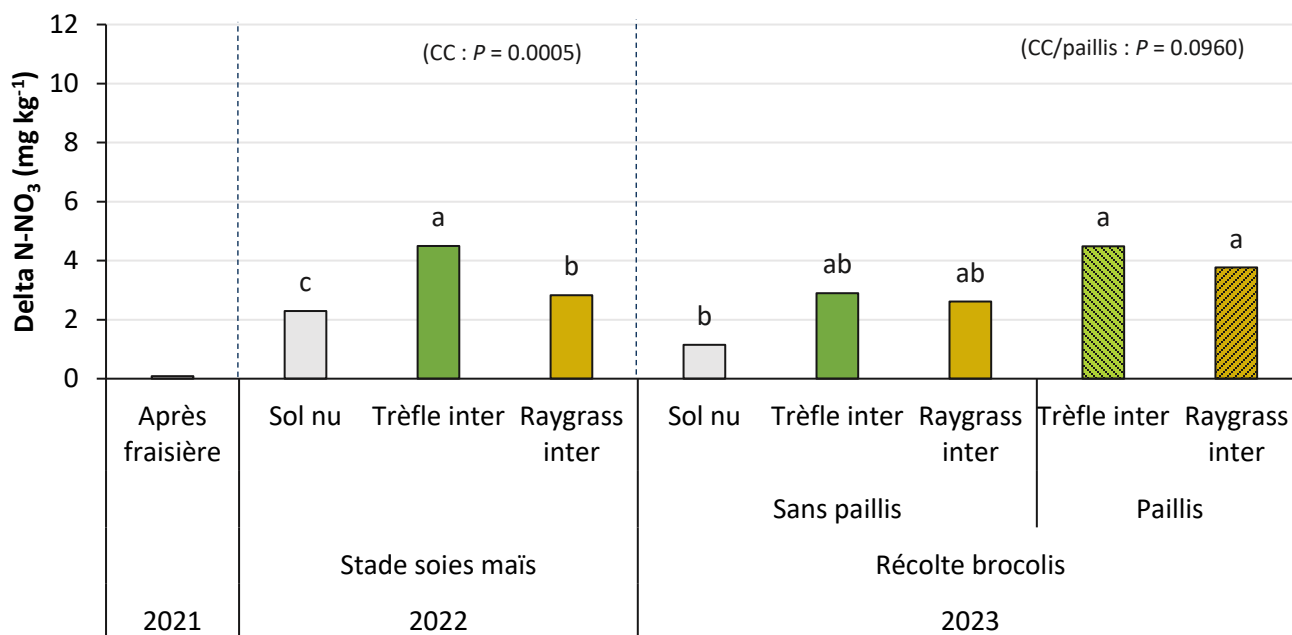


Figure 42. Potentiel de fourniture en nitrate (N-NO₃) du sol en fonction des traitements sans (Sol nu) ou avec antécédent de cultures de couverture (CC) combinées ou non à du paillis fauché-récolté après la destruction de la fraisière (4 août 2021), au stade soies du maïs sucré (17 août 2022) et à la récolte des brocolis (17 juillet 2023), dans le dispositif tardif. Les barres identifiées de lettres distinctes sont minimalement différentes au seuil de $P < 0.10$.

4.7 ÉVOLUTION DU STATUT STRUCTURAL DU SOL À LA FIN DES ROTATIONS (2023)

La qualité structurale (profil pédologique) de tous les traitements des deux dispositifs a été améliorée en fin de projet comparativement à l'état initial de 2021, soit juste avant la destruction de la fraisière. Pour le dispositif hâtif, l'amélioration de la structure était particulièrement présente au niveau de l'horizon Ap2 (10-30 cm) et les résultats sont semblables pour les trois traitements avec ou sans CC. Cependant, la Prairie post a obtenu une note légèrement plus élevée en surface pour la couche 0-10 cm (Ap1) que les deux autres traitements. Tout comme pour le dispositif hâtif, une amélioration de la qualité structurale de tous les traitements et du même ordre a été visible dans le dispositif tardif, même si les traitements avec CC, avec ou sans paillis, montraient une amélioration plus marquée dans l'horizon Ap1, variant de bon à très bon. Alors que pour le Sol nu, c'est au niveau de l'Ap2 que l'amélioration était la plus marquée. Dans ce dispositif, le traitement Raygrass inter avec paillis a obtenu les meilleurs résultats.

Ces résultats semblent contraster avec ceux obtenus avec le test santé globale du sol, surtout pour le dispositif tardif où la cote physique a diminué en fin de projet (section 4.6.2). Néanmoins ces résultats s'expliquent et sont complémentaires. Après les trois ans de la fraisière, le sol non travaillé s'est affaissé, ce qui s'est traduit par une compaction de l'horizon Ap et une réduction de l'accès des racines à l'horizon Ap2. Cette compaction a donc été relevée lors de l'évaluation structurale du sol en début de projet en 2021 (Tableau 4) et la qualité du sol a été évaluée comme modérée, avec surtout une absence de porosité. Trois ans plus tard, avec des cultures annuelles, le travail annuel de sol est venu décompacter l'horizon Ap et les racines des plantes ont pu coloniser le sol plus en profondeur (Ap2), ce qui a contribué à accroître la porosité et donc la qualité structurale du sol en fin de projet, surtout dans l'horizon Ap2. En contrepartie, pour les paramètres physiques du test de santé globale des sols, soit la proportion et la stabilité des agrégats de l'horizon 0-20 cm, ceux-ci se constituent à plus long terme. Dans le sol à l'étude, dès le début du projet, les résultats pour ces paramètres étaient faibles et aucune amélioration n'a pu être détectée après trois ans seulement. Globalement les résultats témoignent que la travail de sol après la fraisière a favorisé la porosité du sol mais qu'après seulement trois ans, malgré l'intégration de bonnes pratiques comme les CC, cela n'a pas été suffisant pour améliorer significativement la proportion et la stabilité des agrégats de l'horizon de surface.

Les résultats résumés de l'IQSPM sont décrits aux sections 4.7.1.1 et 4.7.1.2 et présentés au Tableau 13. L'Annexe B présente quant à elle les observations exhaustives.

4.7.1.1 Dispositif hâtif

La présence de la Prairie inter a favorisé une structure plus fine dans tous les horizons en 2023 contrairement à 2021. De plus, la porosité a augmenté dans l'horizon Ap2. Une amélioration de la qualité structurale pour toutes les répétitions, particulièrement dans l'horizon Ap2 (10-30 cm), a été remarquée. La répétition 1 (Prairie inter (B1)) a obtenu la meilleure note, soit 9,5 (très bon). Ainsi, une amélioration par rapport à 2021 était présente pour les deux horizons, mais c'est au niveau de l'horizon Ap2 qu'elle a été la plus marquée. Avec la Prairie post, une amélioration de la qualité structurale était aussi notable par une structure plus fine et un grade plus fort dans les horizons Ap1 et Ap2 de toutes les répétitions. La porosité était également plus abondante dans l'horizon Ap2. Pour ce traitement également, l'horizon Ap2 de la répétition du bloc 1 a obtenu la meilleure note de 9,5 (très bon). Enfin, une amélioration de la qualité structurale pour tous les horizons avec Prairie post était présente comparativement à 2021. Là aussi, l'augmentation de la qualité structurale était particulièrement marquée dans l'horizon Ap2. Pour le Sol nu dans la rotation hâtive, en général, une structure plus fine a tout de même été observée dans tous les horizons. Il y avait également une augmentation de l'abondance de la porosité dans l'horizon Ap2. La répétition présentant le meilleur résultat pour l'horizon Ap2 était dans ce cas le bloc 2 (Sol nu (B2)) avec une note de 9,2. Ainsi, une amélioration de la qualité structurale par rapport à 2021 a été notée et était particulièrement marquée dans l'horizon Ap2. Une hypothèse pour expliquer cette amélioration serait la présence d'un couvert d'adventices important (présence de racines), ce qui peut avoir eu un impact sur la porosité observée et donc sur les résultats de l'IQSPM.

Ainsi, les trois traitements du dispositif hâtif ont présenté une amélioration de la qualité structurale des sols comparativement aux résultats obtenus avant leur implantation en 2021. Cette amélioration était particulièrement marquée dans l'horizon Ap2 pour tous les traitements et aucun traitement ne se démarquait pour cet horizon. La Prairie post a obtenu de meilleurs résultats pour l'horizon Ap1 avec une note minimum de 6,6, un maximum de 9,5 et une moyenne de 6,9 (Tableau 13).

4.7.1.2 Dispositif tardif

Le traitement avec Raygrass inter mais sans paillis avec les brocolis montrait une porosité abondante et une structure fine et stable (grade plus fort). Une structure grossière était également observée au profil de la répétition 3 (Raygrass inter sans paillis (B3)) dans l'horizon Ap2, avec un niveau de qualité structurale modéré (6,6) (Annexe B, Tableau 19). La qualité structurale a été améliorée de façon plus importante au niveau de l'horizon Ap1 avec une moyenne de 8,5 comparativement à une moyenne de 5,7 pour le profil avant l'implantation du traitement. Lorsque le paillis était présent, la structure était aussi fine et stable, avec une porosité abondante dans tous les horizons des différents profils. La qualité structurale a aussi été améliorée, particulièrement dans l'horizon Ap1 (moyenne de 9,3 (très bon)). La cote de qualité structurale était également plus élevée que le traitement sans paillis pour tous les horizons.

Pour le traitement avec Trèfle inter sans paillis, une structure moyenne à grossière et une stabilité structurale modérée à forte, ainsi qu'une porosité abondante, ont été observées. Cependant, une structure très grossière a été notée dans la répétition 3 (Trèfle inter sans paillis (B3)), dans l'horizon Ap2. La qualité structurale a donc été améliorée, ce qui a été observé de façon plus importante au niveau de l'horizon Ap1 (9,3 (très bon)). Lorsque du paillis était présent, une structure fine et stable, ainsi qu'une porosité abondante, a été observée. La qualité structurale a été également améliorée dans tout l'horizon de surface (Ap1 et Ap2). Le traitement avec paillis a obtenu une note de qualité structurale similaire, entre l'horizon Ap1 et Ap2, à celle obtenue pour le traitement sans paillis. Cependant, le traitement sans paillis a obtenu une meilleure note pour les premiers 10 cm de sol (Ap1) (Tableau 13).

Enfin, avec le traitement Sol nu, comme dans le dispositif hâtif, une amélioration de la qualité structurale a été mesurée comparativement à l'état structural de 2021. La porosité y était plus abondante et c'est au niveau de l'horizon Ap2 que les améliorations ont été particulièrement prononcées. Pour le profil de la répétition 2 (Sol nu (B2)), une structure de surface (Ap1, 0-10 cm) très grossière a été observée.

Les traitements du dispositif tardif ont donc présenté une amélioration de la qualité structurale des sols comparativement aux résultats obtenus avant leur implantation en 2021. Pour les traitements avec CC, avec ou sans paillis, une amélioration de la structure a été particulièrement présente dans l'horizon Ap1, soit les 10 premiers cm de sol. Avec le Sol nu, l'amélioration était alors plus marquée dans l'Ap2. Pour les traitements avec paillis, une amélioration de l'horizon Ap2 a aussi été plus marquée qu'avec les traitements sans paillis. C'est toutefois le traitement avec Raygrass inter + paillis qui a obtenu globalement les meilleurs résultats du dispositif tardif.



Figure 43. Profils à la fin de la rotation en 2023 dans le traitement Prairie post-récolte du dispositif hâtif et à la fin de la rotation en 2023 dans le traitement Raygrass intercalaire du dispositif tardif.

Tableau 13. Résumé de l'IQPSM¹ des différents traitements (Ap1 et Ap2)

Dispositif	Traitement	Année	Horizon (Hz)	Min	Max	Moyenne	Niveau de qualité	
Hâtif	Après fraisière	2021	Ap1	5,7	5,7	5,7	Modéré	
			Ap2	4,7	6,5	5,6	Modéré	
	Sol nu	2023	Ap1	5,7	8,0	6,6	Bon	
			Ap2	8,0	9,2	8,6	Bon	
	Prairie inter		Ap1	6,2	6,6	6,5	Modéré	
			Ap2	8,0	9,5	8,6	Bon	
	Prairie post		Ap1	6,6	7,1	6,9	Bon	
			Ap2	7,5	9,5	8,4	Bon	
	Tardif		Sol nu	Ap1	6,1	8,3	7,2	Bon
				Ap2	8,3	8,3	8,3	Bon
			Trèfle inter	Ap1	9,3	9,3	9,3	Très bon
				Ap2	7,1	8,3	7,7	Bon
Raygrass inter		Ap1	8,3	8,7	8,5	Bon		
		Ap2	6,6	8,8	7,7	Bon		
Trèfle inter + Paillis		Ap1	7,8	8,6	8,2	Bon		
		Ap2	7,1	8,8	8,0	Bon		
Raygrass inter + paillis		Ap1	9,2	9,3	9,3	Très bon		
		Ap2	8,3	8,7	8,5	Bon		

¹ Indicateur de la qualité physique des sols minéraux

4.8 COÛTS ET BÉNÉFICES

Le Tableau 14 décrit en détail les coûts associés à l'implantation des cultures de couverture (CC) selon les différents scénarios à l'étude et pour toute la durée des rotations (3 ans). L'implantation annuelle de CC pendant 3 ans a coûté entre 786 \$ et 971 \$ à l'hectare, selon le choix de la stratégie. La stratégie la moins coûteuse a été celle du dispositif en maïs sucré tardif avec du Raygrass inter (sans paillis à l'année brocolis), essentiellement car le coût de la semence de ray-grass était moins élevé que celui du trèfle incarnat du traitement Trèfle inter. De l'autre côté, la stratégie la plus dispendieuse a été celle avec le mélange prairie implanté en post-récolte du maïs sucré hâtif (Prairie post), suivi de la fauche de cette prairie l'année suivante. Ceci s'explique par le travail de sol additionnel pour planter la Prairie post contrairement à la stratégie d'implantation de la prairie en intercalaire du maïs hâtif (Prairie inter) qui a été réalisée au même moment que le fractionnement de l'engrais. Ces coûts additionnels, en comparaison de la rotation avec Sol nu, ont ensuite été soustraits des revenus obtenus à la fin des rotations. Pour deux rotations, les rendements additionnels obtenus grâce à l'implantation des CC se sont traduits par des gains nets positifs de plusieurs milliers de dollars à l'hectare. En effet, les rotations avec le maïs sucré tardif intégrant du trèfle incarnat en intercalaire sur un retour de prairie implantée l'automne précédant ont dégagé des gains additionnels de 2678 \$ ha⁻¹ (en absence de paillis à l'année brocolis) et de 3353 \$ ha⁻¹ (en présence de paillis à l'année brocolis), à l'échelle de la rotation, en comparaison du Sol nu. À l'inverse des résultats observés dans les autres rotations, celles intégrant du maïs sucré hâtif, après une culture de couverture annuelle (avoine-pois) puis de l'implantation d'une prairie, que ce soit en intercalaire ou en post-récolte, ont généré des pertes nettes de 316 \$ et 340 \$ par hectare sur l'ensemble de la rotation. Ces pertes doivent toutefois être interprétées avec prudence, car le suivi de cette rotation s'est terminé en juin 2023, après la fauche de la prairie. Ainsi, les revenus potentiels de la culture principale tardive, implantée après la prairie, n'ont pas été pris en compte. L'inclusion de ces revenus aurait potentiellement modulé le bilan économique de cette rotation en un gain net. Du côté de la rotation avec maïs sucré tardif, l'utilisation du ray-grass en intercalaire dans le maïs en 2022 a entraîné une baisse de rendement du brocoli en 2023 et ce, indépendamment de l'application de paillis. Cette diminution de performance peut s'expliquer en partie par la fertilisation réduite en N appliquée à toutes les rotations. Le ray-grass, une graminée, a probablement prélevé une portion de l'azote disponible dans le sol au détriment du brocoli, contrairement à la régie sans culture de couverture. Ainsi, les pertes de rendement observées dans le brocoli auraient possiblement pu être évitées avec une fertilisation azotée optimale. Enfin, il est important de souligner que les comparaisons économiques, basées uniquement sur les coûts d'implantation et les revenus des cultures principales sur une période de trois ans, ne tiennent pas compte des bénéfices à moyen et long terme liés à l'intégration des CC. Ces dernières contribuent à l'amélioration de la fertilité et de la santé des sols, ce qui peut avoir un impact positif durable sur la productivité des cultures, en comparaison du sol toujours laissé à nu.

4.8.1 Limites de l'étude économique

Dans le cadre de cette étude, toutes les rotations ont été conduites avec une fertilisation azotée réduite (-15 % de la dose recommandée). Cette sous-fertilisation pourrait avoir influencé l'évaluation des gains (positifs ou négatifs) associés à l'implantation des CC. En effet, les rendements attendus ont été appliqués à la régie témoin, soit celle avec un sol nu. Ainsi, les revenus générés par les régies intégrant des CC ont été comparés à ceux de cette régie de référence. Or, si la fertilisation avait été optimale, il est probable que les rendements et donc les revenus de la rotation avec Sol nu auraient été plus élevés. Par conséquent, les marges économiques calculées pour les régies avec CC pourraient avoir été surestimées. Ainsi, il n'est pas possible de connaître dans quelle mesure les différences observées entre les régies sont attribuables à la seule présence des CC, et non à un biais introduit par une fertilisation réduite. Il est donc possible que les écarts de rendement entre les différentes rotations aient été soit réduits, soit accentués, si une fertilisation azotée optimale avait été appliquée uniformément.

Tableau 14. Coûts d'implantations des cultures de couverture et gain net à l'échelle de la rotation pour le dispositif avec maïs sucré hâtif ou avec maïs sucré tardif de 2021 à 2023.

Opérations et échantillonnages	Dispositif maïs hâtif			Dispositif maïs tardif				
	Sol nu	Prairie inter	Prairie post	Sol nu	Trèfle inter		Raygrass inter	
					Sans paillis	Paillis	Sans paillis	Paillis
Coûts d'implantations des CC								
2021								
Fraisière - destruction	Coût uniforme							
Semis des CC dérobées (coût semences)	- \$	Mélange Avoine/ Pois 280 \$	Mélange Avoine/ Pois 280 \$	- \$	Mélange vivace (prairie) 466 \$		Mélange vivace (prairie) 466 \$	
Semis des CC dérobées (coût implantation)	- \$	31 \$	31 \$	- \$	36 \$		36 \$	
2022								
Fauche prairie vivaces et travail de sol	.			88 \$				
Semis et fertilisation du maïs sucré	Coût uniforme							
Semis CC intercalaires (coût semences)	- \$	Mélange vivace (prairie) 466 \$	- \$	- \$	Trèfle incarnat 205 \$		Ray-grass fourrager 175 \$	
Semis CC intercalaires (coût implantation)	- \$	23 \$	- \$	- \$	26 \$		21 \$	
Récolte du maïs sucré	Coût uniforme							
Incorporation résidus maïs pour implantation CC post-récolte	- \$	- \$	38 \$	- \$				
Semis CC post-récolte (coût semences)	- \$	- \$	Mélange vivace (prairie) 466 \$	- \$				
Semis CC post-récolte (coût implantation)	- \$	- \$	36 \$	- \$				
2023								
Plantation et fertilisation des brocolis	.			Coût uniforme				
Fauche de la biomasse de la prairie	- \$	34 \$	34 \$	.				
Exportation et épandage de la biomasse prairie	- \$	86 \$	86 \$	- \$	- \$	86 \$	- \$	86 \$
Destruction de la prairie pour culture légumière (scénario envisageable)	- \$	88 \$	88 \$	- \$				
Semis et fertilisation culture légumière	Coût uniforme			- \$				
Coûts inclusion CC dans la rotation (\$/ha)	0 \$	921 \$	971 \$	0 \$	821 \$	907 \$	786 \$	872 \$
Gains de rendements (\$/ha)								
2022 : maïs sucré	- \$	605 \$	631 \$	- \$	1626 \$		1 333 \$	
2023 : brocolis	- \$	- \$	- \$	- \$	1873 \$	2634 \$	(810) \$	(1189) \$
Gains nets (\$/ha)	- \$	(316) \$	(340) \$	- \$	2678 \$	3353 \$	(263) \$	(728) \$

5 CONCLUSION

Ce projet visait à évaluer l'impact de différentes stratégies de cultures de couverture (CC) et de paillis frais fauché-récolté sur la santé des sols et la performance agronomique en production maraîchère conventionnelle, dans deux dispositifs distincts : l'un avec du maïs sucré hâtif, l'autre du maïs sucré tardif. Dans le dispositif hâtif, des CC annuelles (avoine-pois) ont été implantées après une fraisière, suivies d'un maïs sucré hâtif et d'une prairie vivace (intercalaire ou post-récolte) en 2022, fauchée en juin de la 3^{ième} année (2023). Dans le dispositif tardif, une prairie implantée en 2021, après la fraisière, a été suivie d'un maïs sucré tardif en 2022 avec CC annuelles intercalaires (CCI) (trèfle ou ray-grass annuel (raygrass)), puis d'une culture de brocolis en 2023, incluant ou non du paillis fauché-récolté provenant de la prairie du dispositif hâtif. Pour chacun des dispositifs, tout au long des rotations (3 ans), un traitement avec sol nu (sans CC ni paillis) était également inclus.

Un premier constat est qu'après trois ans, la qualité structurale du sol s'est améliorée dans tous les traitements des deux dispositifs, incluant le Sol nu, particulièrement dans l'horizon Ap2. Le travail du sol suivant la fraisière a décompacté et favorisé la colonisation racinaire plus en profondeur, ce qui explique ces améliorations. Au niveau du test de santé globale du sol, aucune amélioration notable n'a toutefois été détectée, avec ou sans CC dans les deux dispositifs. De surcroît, dans le dispositif tardif, la cote physique en surface (0-20 cm), qui était déjà dégradée en début de projet, s'est détériorée davantage (17/100 à 8/100), ce qui serait attribuable aux sarclages répétés dans les brocolis.

Dans le dispositif hâtif, les CC, quant à elles, ont permis une bonne production de biomasse, avec un estimé de 84 kg N_{dispo} ha⁻¹ pour le mélange avoine-pois et entre 24 et 47 kg N_{dispo} ha⁻¹ pour les prairies vivaces, selon le mode d'implantation, post-récolte ou intercalaire, respectivement. Le rendement en maïs sucré n'a toutefois pas été significativement différent, mais le taux d'épis déclassés était plus faible avec les CC. La concentration de nitrate résiduel dans le sol a aussi été réduite par les CC dès l'automne suivant la fraisière (2021), où le Sol nu présentait une concentration 12x plus élevée que sous avoine-pois. Dans le dispositif tardif, les CC ont aussi produit une biomasse importante, notamment la prairie implantée en 2021 (7 t MS ha⁻¹), avec un estimé à 148 kg N_{dispo} ha⁻¹, soit 6x plus que le même mélange de prairie post-récolte du dispositif hâtif (24 kg N_{dispo} ha⁻¹). Ces écarts soulignent l'influence des conditions météorologiques sur la croissance, la composition végétale et le retour azoté des prairies semées en post-récolte. Les rendements en maïs sucré ont alors été significativement plus élevés avec les CCI sur retour de cette prairie, 344 g épis⁻¹ en moyenne avec le Trèfle inter et le Raygrass inter contre 284 g épis⁻¹ pour le Sol nu. Le taux d'épis déclassés était aussi plus faible avec les CC. Enfin, les rendements en brocolis ont été les plus élevés avec antécédent de Prairie + Trèfle inter et paillis (604 g plant⁻¹), comparativement au Sol nu (540 g plant⁻¹). Le ray-grass, en revanche, n'a pas permis d'améliorer les rendements, même avec paillis. La disponibilité en azote du sol était plus faible avec le Raygrass inter avec ou sans paillis, qu'avec le trèfle. En contrepartie, le ray-grass s'est avéré une source plus intéressante de C labile que le trèfle. L'humidité du sol était aussi mieux conservée dans les parcelles avec paillis, surtout à 5 cm de profondeur. Résultat intéressant, même sans paillis, les précédents de CC contribuaient à une meilleure rétention en eau en comparaison du sol toujours laissé à nu. Enfin, la répression des mauvaises herbes (MH) a été particulièrement efficace avec la Prairie inter, qui a maintenu une couverture en MH inférieure à 5 % pendant la saison. Dans le brocoli, la répression des MH a été significativement plus efficace avec paillis, avec moins de 3 % de couverture, contre 14-18 % sans paillis.

Économiquement, certaines stratégies avec CC, notamment celles intégrant du trèfle en intercalaire + paillis sur un retour de prairie (dispositif tardif), ont généré des gains nets allant jusqu'à 3353 \$ ha⁻¹ sur l'ensemble de la rotation, comparativement au Sol nu. À l'inverse, les rotations du dispositif hâtif ont montré de légères pertes nettes (316-340 \$ ha⁻¹), principalement parce que la culture suivant la prairie en 2023 n'a pas été incluse dans le calcul.

En résumé, l'intégration de CC et de paillis frais dans les rotations maraîchères conventionnelles est non seulement faisable, mais bénéfique pour les rendements, la gestion des MH et la réduction des risques environnementaux. Toutefois, les effets sur la santé globale du sol sont encore limités à court terme, particulièrement dans les contextes de sols sensibles à la compaction et fortement travaillés. Pour améliorer durablement la santé des sols, il serait pertinent de combiner les CC avec une réduction du travail du sol et l'ajout d'amendements structurants. Il faut aussi considérer que les effets cumulatifs des CC sur la structure et la santé du sol se manifestent souvent au-delà de trois ans. Des suivis à plus long terme sont donc nécessaires pour mesurer pleinement les bénéfices agroenvironnementaux de ces pratiques.

6 RÉFÉRENCES

- AFNOR. 2009. Norme expérimentale XP U44-162 : Amendement organiques et supports de culture : Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique.
- AGECO. 2007. Portrait et priorités du secteur maraîcher québécois. Rapport final. 39 pages.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2021. L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux – Rapport numéro 4 [En ligne] Page consultée le 2025-01-28. <https://agriculture.canada.ca/fr/environnement/gestion-ressources/indicateurs/lagriculture-ecologiquement-durable-au-canada-serie-indicateurs-agroenvironnementaux-rapport-numero>
- Alvenäs, G. et Marstorp, H. 1993. Effect of ryegrass catch crop on soil inorganic-N content and simulated nitrate leaching. Swedish J. Agric. Res. 23: 3-14.
- Association des producteurs maraîchers du Québec (APMQ). 2025. Portrait de l'industrie. <https://apmquebec.com/industrie>
- Audet, M.A. 2012. Rapport de projet : utilisation des cultures de couverture dans le maïs ensilage pour contrer l'érosion des sols : semis de ray-grass intercalaire en post-levée et semis de seigle d'automne à la dérobée en post-levée. Réseau Agriconseils de l'Estrie. 47 p.
- Belliard, S. 2019. Cultures intercalaires dans le maïs en début de saison. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/field/news/croptalk/2019/ct-0619a4.htm>
- Bourgeois, B., Charles, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Lynch, D., Bourgeois, G., Bastien, M., Bélanger, V., Landry, C. et Vanasse, A. Interactive effects between cover crop management and the environment modulate benefits to cash crop yields: A meta-analysis. Can. J. Plant Sci. 2022, 102, 656–667.
- Breune, I., Durand, S., Audet, M.A., Parent, G. et Guillou, M. 2015. Le raygrass intercalaire comme culture de couverture dans le maïs fourrager. Club Agroenvironnemental de l'Estrie. Programme Prime-vert. 72 p.
- Canuel Caron, M. et Giroux, D. 2016. Essai de cultures intercalaires dans le maïs sucré. Étude de cas au baccalauréat en agronomie. Université Laval. 8 p.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2016. Références économiques : Engrais verts semés à la dérobée et en intercalaire. AGDEX 537/821b. 5 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2017. Références économiques : Brocoli biologique. Budget à l'hectare. AGDEX 252.19/821. 8 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2022. Machinerie- Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. AGDEX 740/825. 22 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2024. Semences de grandes cultures- Prix. AGDEX 100.45/855. 3 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2024. Foin- Production commerciale – Budget à l'hectare. AGDEX 121/821b. 10 pages.

- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 2025. Maïs sucré. Budget – Quatre méthodes de production en terre minérale. AGDEX 253/821a. 11 pages
- Chahal., I. et Van Eerd, LL. 2023. Do Cover Crops Increase Subsequent Crop Yield in Temperate Climates? A Meta-Analysis. *Sustainability*. 15(8):6517.
- Culman, S.W, Sieglinde, S.S., Green, J.M. et Gentry, L.E. 2013. Short-and Long-Term Labile Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Reflect Management and Predict Corn Agronomic Performance. *Agronomy Journal*. 105 : 493-502.
- Desperrier Roux, J. 2014. Fertilisation post-levée du maïs avec de la matière végétale fraîche : une alternative au fumier. Présentation faite le 2 décembre 2014 au Journées Horticoles de Saint-Rémi.
- Duval, J., Weill, A. et N'Dayegamiye A. 2014. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. 7 p. https://www.cetab.org/system/files/publications/contribution_en_azote_en_provenance_des_engrais_verts_de_le_gumineuses_2.pdf
- Financière agricole du Québec- Direction de l'intégration des programmes. 2022. L'état des cultures au Québec 2022, bilan au 29 novembre 2022, Rapport numéro 15. <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/2022/letat-des-cultures-au-quebec-2022-bilan-au-29-novembre-2022-rapport-numero-15>
- Financière agricole du Québec- Direction de l'intégration des programmes. 2023. L'état des cultures de la FADQ, bilan au 14 novembre 2023, Rapport numéro 14. <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/etat-des-cultures-2023/letat-des-cultures-de-la-fadq-bilan-au-14-novembre-2023-rapport-numero-14>
- FAO 2019. Couverture organique du sol. <http://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/fr/>
- Fernando M. et Shrestha A. 2023. The Potential of Cover Crops for Weed Management: A Sole Tool or Component of an Integrated Weed Management System? *Plants (Basel)*. 8, 12(4):752.
- Frankow-Lindberg, B.E. et Dahlin A.S. 2013. N₂ fixation, N transfer, and yield in grassland communities including a deep-rooted legume or non-legume species. *Plant and Soil*, 370, 567–581.
- Fox, R.H. et Piekielek, W.P. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 743-747.
- Frund, D. 2015. Potentiel d'utilisation de coupes d'herbe de prairie temporaire pour la fumure en système de grandes cultures biologiques sans bétail. Mémoire de Diplôme réalisé dans le cadre de la formation en écologie et sciences de l'environnement ECOFOC. Suisse. 55 p.
- Garcia, C., Hernandez, T. et Costa, F. 1990. Study of water extract of sewage sludge compost. *Soil Sci.Plant Nutr.* 37:399-408
- Gasser, M.-O., Bossé, C., Clément, C.C, Bernard, C., Mathieu, J-B. et Tremblay, M-E. 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 186 pages.
- Gauthier M. et Champagne, M. 2017. Interprétation des résultats associés à l'état de santé globale des composantes physiques, biologiques et chimiques des sols agricoles. *Agro Enviro Lab*. 17 pages
- Gélinas, B. 2016. Du trèfle en grandes cultures : pourquoi s'en passer? <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/centreduquebec/INPACQInfolettre/productionsvegetales/Pages/Dutrefleengrandesculturespourquoisenpasser.aspx>

- Gendron, R. et Vezina, M.J. 2017. Engrais verts en intercalaire dans la production conventionnelle de maïs sucré. Groupe Pro-Conseil. Rapport Programme Prime-Vert. 28 p.
- Giroux, M. et Lemieux, M. 2006. Comparaison de différentes méthodes d'évaluation de la fertilité azotée des sols et détermination de la dose N optimale du maïs-ensilage. *Agrosolutions* 17(1) :39-50.
- Haney, R. L., Brinton, W.H. et Evans, E. 2008. Estimating Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus mineralization from short-term carbon dioxide respiration. *Comm. in Soils Sci. and Plant Anal.* 39:2706-2720.
- Haney, R., Franzluebbers, A., Jin, V., Johnson, M., Haney, E., White, M. et Harmel, R. 2012. Soil Organic C:N vs. Water-Extractable Organic C:N. *Open Journal of Soil Science*, 2 :269-274.
- Isaac, R.A. et Johnson. W.C. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissues using a block digester. *J. Ass. Off. Anal. Chem.* 69: 98-101.
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. 2022. Fiche de description et d'interprétation des séries de sols du Québec - Série de sol Saint-Nicolas. https://irda.blob.core.windows.net/media/7196/irda_fiche_synthese_nicolas_2022.pdf
- Jobin, P. et Douville, Y. 1996. Engrais verts et cultures intercalaires. Centre de développement d'Agrobiologie. Ste-Élizabéth-de-Warwick. 22 p.
- Juma, N., Paul, E.A. et Mary, B. 1984. Kinetic Analysis of Net Nitrogen Mineralization in Soil. *Soil Science Society of America Journal.* 48: 753-757.
- Laliberté, G. 2014. Implantation du ray-grass en culture intercalaire dans le maïs grain et ensilage. Organisme de bassins versants de la zone du Chêne (OBV du Chêne). 37 p.
- Landry, C., Dubé, P., Mainguy, J. et Pagé, D. 2011. Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P, et de l'ISB de la fraction solide de lisier de porcs conditionnée obtenue du séparateur décanteur centrifuge afin d'en déterminer la valeur économique. Rapport final. CDAQ DS 6186. IRDA 95 p.
- Landry, C. et Boivin, C. 2012. Performances des fertilisants à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jours neutres fertiguée. Rapport final. PSIH10-1-355. IRDA. 53 p.
- Landry, C., Côté, C. et Godbout, S. 2017. Évaluation du potentiel de valorisation de résidus granulés de pommes de terre à la ferme pour les filières fertilisation, alimentation animale et énergie. Rapport final-IRDA. 109p.
- Landry C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Côté, C., Généreux, M, Belzile, L. et Godonou, D. 2019. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé/maïs-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Rapport final. IRDA. 18p.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Samson, V. et Langelier, M. 2020. Étude de synchronisation de la fourniture en azote des engrais verts permettant la réduction ou le remplacement des applications de lisier de porc en post-levée du maïs-grain, contexte de transition biologique en Chaudière-Appalaches. Rapport final. IRDA et MAPAQ. 29 p.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Jeanne, T., Mainguy, J., Hogue, R. et Guillemette, S. 2023. Validation des indicateurs de santé des sols comme outil de prédiction de fourniture en azote des sols pour des recommandations en engrais azoté plus justes. Rapport final. IRDA et partenaires. 50 pages.

- Landry, C., Mainguy, J., Marchand-Roy, M., Demers, A et Forest-Drolet J. 2024a. Développement de stratégies de fertilisation dans l'ail biologique combinant des engrais verts et de ferme basées sur leur dynamique de fourniture en N et P et leur impact sur la qualité des sols. Rapport final IA 119038. IRDA et partenaires. 56 pages.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Demers, A. et Jacques, M. 2024b. Effets de la rotation et de la fertilisation sur la santé et le potentiel de productivité des sols en grandes cultures : 40 ans d'essais de longue durée. Conférence présentée le 1^{er} février 2024, Colloque IQDHO 2024, 3^{ième} édition.
- Landry, C., Marchand-Roy, M., Paradis, M. et J. Mainguy. 2025. Essai d'inclusion de cultures fourragères pérennes comme source de N « fauchée-récoltée » dans une rotation longue de production biologique de pommes de terre et de grandes cultures. Rapport final. IRDA et partenaires. 66 pages.
- Langelier, M. 2018. Apports en azote d'engrais verts de légumineuses ou non légumineuses, combinés à une fertilisation minérale ou organique, et effet sur le rendement du blé. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada. 90 pages
- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D. et Schabengerger, O. 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.
- Loughton, A. 2013. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/90-139.htm>
- MAPAQ/ISQ. 2018. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-industrie-horticole.html>
- MAPAQ. 2020. Agir, pour une agriculture durable – Plan 2020-2030. <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-agriculture-durable>
- Mathieu, S. 2015. De la biodiversité dans les champs! https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/articles/production/Pages/De_la_biodiversite_dans_les_champs.aspx
- McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J.A. et Cook, F.D. 1986. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton after 50 years of cropping to two rotations. Can. J. Soil Sci 66:1-19.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et de Parcs. 2022-2023. Faits saillants. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/index.htm>
- Moebius-Clune, B.N, Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., van Es, H.M., Thies, J.E., Shayler, H.A., McBride, M.B., Kurtz, K.S.M., Wolfe, D.W. et Abawi, G.S. 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- M'Seffar. 2009. l'érosion des sols agricoles en Estrie, causes et conséquences. Essai de Maîtrise. Université de Sherbrooke. 163 p.
- Normandin. 2017. L'érosion coûte des milliards aux producteurs. Le Bulletin des Agriculteurs. 12 décembre 2017. <https://www.lebulletin.com/cultures/lerosion-coute-des-milliards-aux-producteurs-89820>
- Rémillard, P. 2019. Maïs aux 60 pouces : résultats d'un réseau d'essai à la ferme. Présentation aux Journées Horticoles de Saint-Rémi

- Robert, L. 2015. Les intercalaires dans le maïs: comment en tirer les meilleurs bénéfices. Présentation Journée INPACQ grandes cultures et conservation des sols.
- Rochon, A. et Giroux, D. 2018. Faisabilité du semis de cultures intercalaires d'engrais verts dans le maïs sucré avec 3 modèles de semoir. Rapport final. Prime-Vert. 12 p.
- Roudaut, J.-P., Gaspard, M., Boyer, G. et coll. 2011. Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Guide technique : Tome 1. Chambre régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon, France, 128 p.
- Samson, M-E., Angers, D.A., Poirier, V. 2023. Séquestrer du carbone dans les sols agricoles du Québec; concepts, perspectives et défis. Rapport remis au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Québec, Université Laval, 106 p.
- Sarrantonio, M. 2012. Building soil fertility and tilth with cover crop. Managing Cover crops Profitably. 3ième édition. 16-24 p.
- Sullivan, D.M., Andrews, N. et Brewer, L. 2020. Estimating plant-available nitrogen release from cover crops. A PNW Extension Publication. <https://extension.oregonstate.edu/catalog/pub/pnw-636-estimating-plant-available-nitrogen-release-cover-crops>
- Surdek, N. 2016. Promouvoir l'introduction de plantes intercalaires en production maraîchère. Présentation Trois-Rivières. https://www.craaq.qc.ca/documents/files/Comites/CLEG/E7_Nadia_Surdeck_intercalaire.pdf
- Thibaudeau, S. et Deniger, G. 2018. Semis d'intercalaires dans le maïs avec un semoir à céréales modifié. Présentation Journées Culture de Couvertures 2018.
- Thomsen, I.K. et Hansen, E.M. 2014. Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre and postharvest sowing and time of incorporation. Soil Use Manage. 30: 48-57.
- Vanasse, A., Charles, A. et Tremblay, N. 2016. Contribution des cultures de couverture aux rendements des grandes cultures, à la dynamique de l'azote et à la qualité des sols. Rapport Projet IA214152. 3 p.
- Vanasse, A. Thibaudeau, S. et Weill, A. 2022 Guide des cultures de couverture en grandes cultures. CRAAQ. 204 pages.
- Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B. et Samson-Liebig, S.E. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. Am. J. of Alt. Agric. 18: 3–17. doi:10.1079/AJAA2003003
- Weill, A. et Duval, J. 2009. Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée. Module 8, Chapitre 16. 14 p.
- Weill, A. et Lafrance, D. 2016. Essais de mélange d'engrais verts d'automne et d'été pour la production maraîchère. Présentation CETAB
- Weill, A. 2019. Stratégies de rotations d'engrais verts avec l'ail : 4 scénarios. Présentation au Colloque Bio pour tous du CETAB. Février 2019.
- Weiss, G.L.D. 2018. Effet des cultures de couverture sur la stabilité structurale de sols tills en Estrie. Rapport final. Prime-Vert. 18 p.
- Wukasz, R.T. 1990. Maladies fongiques des crucifères cultivées. OMAFRA.

Yan, F. et Arthur, E. 2025. Cover crops alter soil physicochemical properties: A global meta-analysis. *Geoderma*. 460 : 117436.

Annexe A – Impact du paillis sur l’apport en N disponible à la culture de brocolis

Les flux d’ions N-NO_3 ont été suivis à l’aide de membranes d’échanges anioniques (MEI). Cet outil permet de simuler l’absorption du nitrate par les racines des plantes et ainsi, de comparer l’intensité des flux de N-NO_3 ($\mu\text{g cm}^{-2}$ période⁻¹) du sol en fonction des différents traitements. Les MEI (anionique AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) sous forme de petites plaquettes de vinyle mesurant 5,4 x 2,4 cm, captent de façon cumulative les ions NO_3^- puisqu’elles contiennent un groupement chargé, saturé d’un contre-ion. Ce contre-ion est relâché dans le sol en échange de l’ion ciblé, ici le NO_3^- , pour lequel le groupement possède une affinité beaucoup plus grande. Ceci assure la sorption *in situ*, en continu, de l’ion ciblé et sa retenue sur les MEI jusqu’à ce que celles-ci soient récupérées au champ et que les ions soient extraits au laboratoire. Les MEI ont été insérées dans les répétitions 1 à 3 des traitements avec CC Raygrass inter, avec ou sans paillis ainsi que dans le Sol nu. Deux MEI par répétition étaient placées à deux endroits différents dans la parcelle, à près de 10 cm des plants dans l’entre-rang, entre deux plants de brocoli. Les MEI ont été insérées de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate 0-20 cm de sol. Elles ont été laissées au champ pour deux périodes de deux semaines et une période de 5 jours avant d’être changées pour de nouvelles pour un total de trois périodes. Les MEI des trois répétitions d’un même traitement ont été combinées pour former 1 échantillon composite expédié au laboratoire pour analyse. Les MEI ont été nettoyées à l’eau déminéralisée et placées ensemble dans un tube d’extraction contenant une solution de KCl 2M. Les tubes ont été agités deux heures et la solution extractive filtrée. Par la suite, le N-NO_3 de cette solution a été dosé au Technicon. Les flux ont été exprimés par unité de surface de MEI, par période, soit en $\mu\text{g cm}^{-2}$ période⁻¹ (WesternAg 2019) (Figure 44).

De plus, des analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites de la strate de sol 0-20 cm pour mesurer la concentration en N-NO_3 à différents moments durant la saison de croissance, soit en même temps que les retraits des MEI : juste avant l’ajout de paillis (28 juin), 2 semaines après l’ajout du paillis (12 juillet) et 5 jours plus tard (17 juillet) (Figure 45). Pour constituer les échantillons composites envoyés en laboratoire, six sous-échantillons ont été prélevés dans chaque répétition de chaque traitement, totalisant 18 sous-échantillons par traitement.

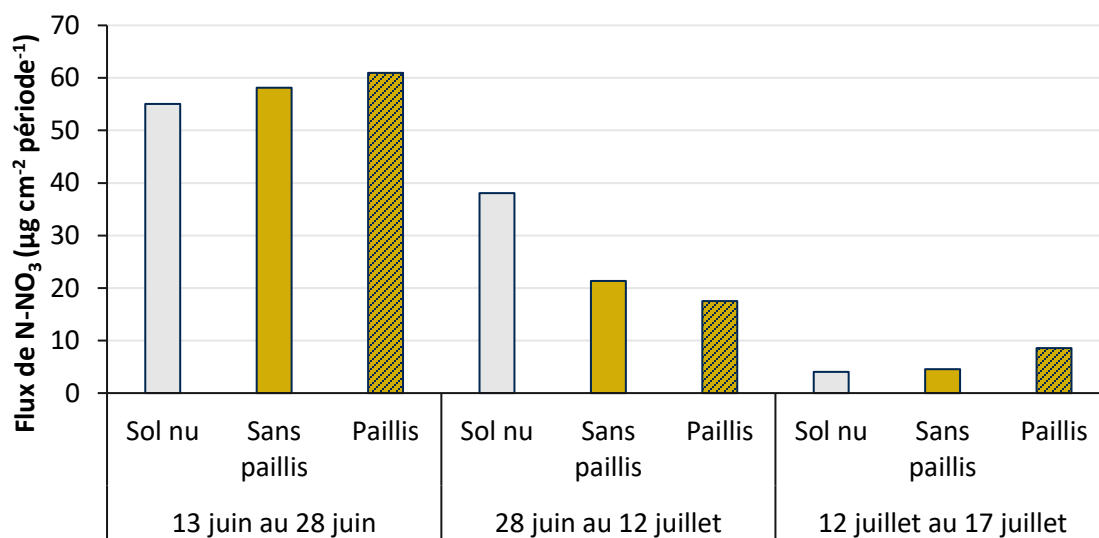


Figure 44. Flux de N-NO_3 dans le sol des parcelles avec ou sans paillis de fauché-récolté et avec antécédent de ray-grass intercalaire dans le maïs sucré (2022) ou dans les parcelles de sol nu, de la mise en place du paillis (13 juin 2023) jusqu’à la récolte du brocoli (17 juillet 2023).

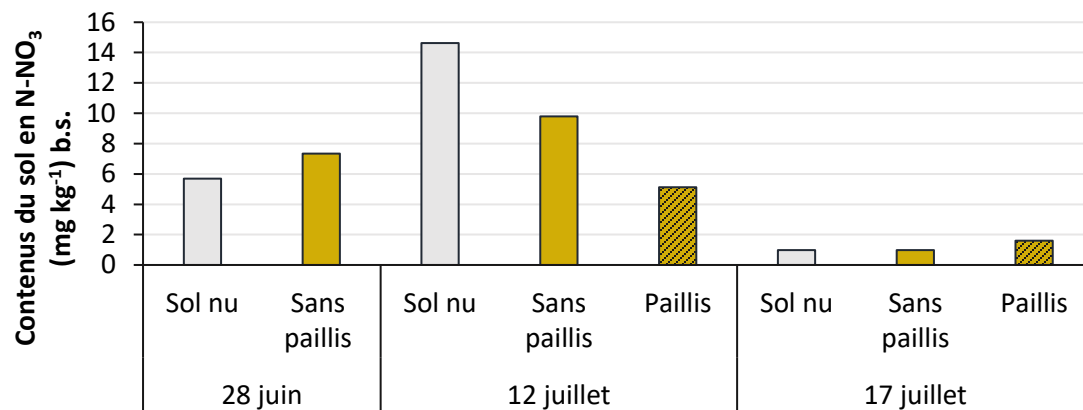


Figure 45. Concentration en N-NO₃ du sol des parcelles avec ou sans paillis de fauché-récolté et avec antécédent de ray-grass intercalaire dans le maïs sucré (2022) ou dans les parcelles de sol nu, à trois moments pendant la saison de croissance des brocolis (2023).

Annexe B – Résultats détaillés des profils réalisés

Tableau 15. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif avec le traitement Prairie inter (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B1-Prairie inter	Ap1	0-10	Granulaire, très fine, modéré	Très friable	Absent	Absent	6,2	Modéré
	Ap2	10-31	Granulaire, moyenne à grossière, fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,5	Très Bon
B2-Pairie inter	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	10-33	Subangulaire, fine, modéré à fort	Friable	Très abondant	Absent	8,0	Bon
B3-Prairie inter	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	10-26	Subangulaire, fine, modéré à fort	Friable	Très abondant	Absent	8,0	Bon
B4-Prairie inter	Ap1	0-10	Granulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	10-30	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Friable	Très abondant	Abondant	8,9	Très Bon

Tableau 16. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif hâtif avec le traitement Prairie post (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B1-Prairie post	Ap1	0-14	Granulaire, fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	14-31	Granulaire, moyenne à grossière, fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,5	Très Bon
B2-Prairie post	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Peu abondant	7,1	Bon
	Ap2	10-31	Subangulaire, fine, modéré à fort	Friable	Très abondant	Peu abondant	8,5	Bon
B3-Prairie post	Ap1	0-12	Granulaire, très fine, modéré	Très friable	Absent	Abondant	7,1	Bon
	Ap2	12-36	Subangulaire, fine, modéré à fort	Friable	Très abondant	Peu abondant	8,0	Bon
B4-Prairie post	Ap1	0-12	Granulaire, très fine à fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	10-35	Subangulaire, fine à moyenne, modéré	Friable	Très abondant	Absent	7,5	Bon

Tableau 17. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif hâtif dans le traitement Sol nu (Ap1 et Ap2), pour les 4 répétitions (B1 à B4), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B1-Sol nu	Ap1	0-11	Granulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	11-30	Subangulaire, fine, modéré à fort	Friable	Très abondant	Absent	8,0	Bon
B2-Sol nu	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, modéré	Très friable	Absent	Abondant	7,1	Bon
	Ap2	10-39	Granulaire, grossière, fort	Friable	Très abondant	Abondant	9,2	Très Bon
B3-Sol nu	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, faible à modéré	Très friable	Absent	Absent	5,7	Modéré
	Ap2	10-32	Subangulaire, fine à moyenne, modéré	Friable	Très abondant	Abondant	8,5	Bon
B4-Sol nu	Ap1	0-10	Granulaire, très fine à fine, modéré à fort	Très friable	Absent	Absent	6,6	Bon
	Ap2	10-40	Subangulaire, fine, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Peu abondant	8,8	Bon

Tableau 18. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Raygrass inter, sans et avec paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B2-Raygrass inter	Ap1	0-10	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Peu abondant	8,3	Bon
	Ap2	10-28	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Peu abondant	8,8	Bon
B3-Raygrass inter	Ap1	0-11	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Abondant	8,7	Bon
	Ap2	11-29	Subangulaire, grossière, modéré	Friable	Très abondant	Peu abondant	6,6	Modéré
B2-Raygrass inter - paillis	Ap1	0-10	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,3	Très Bon
	Ap2	10-25	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Abondant	8,7	Bon
B3-Raygrass inter - paillis	Ap1	0-11	Granulaire, fine à moyenne, fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,2	Très Bon
	Ap2	11-36	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Abondant	Abondant	8,3	Bon

Tableau 19. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Trèfle inter, sans et avec paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B2-Trèfle inter	Ap1	0-11	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,3	Très bon
	Ap2	11-32	Subangulaire, moyenne, modéré	Très friable	Très abondant	Abondant	8,3	Bon
B3-Trèfle inter	Ap1	0-12	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Abondant	9,3	Très bon
	Ap2	12-28	Subangulaire, très grossière, modéré	Friable	Très abondant	Abondant	7,1	Bon
B2-Trèfle inter- paillis	Ap1	0-13	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Absent	7,8	Bon
	Ap2	13-32	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Peu abondant	8,8	Bon
B3-Trèfle inter- paillis	Ap1	0-13	Granulaire, moyenne à grossière, fort	Très friable	Très abondant	Absent	8,6	Bon
	Ap2	13-36	Subangulaire, grossière, modéré	Friable	Très abondant	Abondant	7,1	Bon

Tableau 20. Résultats de l'IQPSM des profils réalisés dans le dispositif tardif dans le traitement Sol nu, sans paillis (Ap1 et Ap2), pour les 2 répétitions (B2 et B3), en 2023.

Profil	Hz	Prof. (cm)	Structure	Consistance	Porosité fine	Porosité grossière	Note IQPSM	Niveau de qualité
B2-Sol nu	Ap1	0-11	Subangulaire, très grossière, modéré	Friable	Très abondant	Absent	6,1	Modéré
	Ap2	11-33	Subangulaire, moyenne, modéré	Très friable	Très abondant	Abondant	8,3	Bon
B3-Sol nu	Ap1	0-11	Subangulaire, fine à moyenne, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Absent	8,3	Bon
	Ap2	11-30	Subangulaire, moyenne à grossière, modéré à fort	Très friable	Très abondant	Peu abondant	8,3	Bon