

**STOCKER DU CARBONE AVEC DIFFÉRENTES RÉGIE DE PAISSANCE DE MÉLANGES
FOURRAGERS COMPLEXES**

PROJET NO 16-GES-17

DURÉE DU PROJET : MAI 2017/AVRIL 2020

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Vincent Poirier¹, Carole Lafrenière¹, Hiba Benmohamed¹, Jean Lafond²,
Julie Lajeunesse² et Antoine Riverin³

¹ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Unité de recherche et développement en agriculture et agroalimentaire, 79 rue Côté, Notre-Dame-du-Nord, Québec, J0Z 3B0

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, Ferme de Recherche, 1468 rue St-Cyrille, Normandin, Québec, G8M 4K3

³ Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Direction régionale du Saguenay-Lac-St-Jean, 801 Chemin du Pont-Taché Nord, Alma, Québec, G8B 5W2

30 avril 2020

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

STOCKER DU CARBONE AVEC DIFFÉRENTES RÉGIES DE PAISSANCE DE MÉLANGES FOURRAGERS COMPLEXES

PROJET NO 16-GES-17

RÉSUMÉ DU PROJET

La régie de paissance et les mélanges fourragers complexes peuvent influencer les rendements et la valeur nutritives des fourrages, et du même coup affecter les coûts d'alimentation des animaux. De plus, le mode de paissance (i.e., continue vs rotation) peut influencer la biomasse racinaire des plantes fourragères ainsi que les quantités de carbone (C) stocké dans le sol. La paissance en continue est celle où les animaux demeurent dans la parcelle aussi longtemps que les fourrages peuvent combler leurs besoins, alors celle faite en rotation offre un temps de repos aux plantes, ce qui assure un meilleur rendement et une meilleure persistance des légumineuses et des graminées les plus productives. L'objectif général de ce projet était de démontrer que la paissance en rotation de mélanges fourragers complexes permet d'améliorer le système d'alimentation des bovins de boucherie et d'accroître le stockage du C dans le sol. Entre 2017 et 2019, nous avons simulé mécaniquement la paissance en continu ou en rotation de différents mélanges fourragers complexes composés de graminées associées à la luzerne sur des parcelles situées à la ferme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Normandin. Bien que les différences furent relativement faibles d'un point de vue agronomique, les rendements en fourrages furent plus élevés pour la paissance en rotation, laquelle est aussi plus économique que la paissance en continu. Enfin, nos résultats suggèrent que la paissance en rotation favorise la production d'une biomasse racinaire plus abondante et plus facilement décomposable par les microorganismes que la paissance en continu. Ceci conduit, dans les années suivantes, à une augmentation de la concentration et du stockage du C sous des formes stables, et ce non seulement en surface, mais aussi en profondeur dans le sol.

La référence suivant est suggérée pour citer le rapport:

Poirier V, Lafrenière C, Benmohamed H, Lajeunesse J, Lafond J, Riverin A (2020). Stocker du carbone avec différentes régies de paissance de mélanges fourragers complexes – Rapport Final. Projet No. 16-GES-17, Programme Prime-Vert Volet 4 – Appui au développement et au transfert de connaissances, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 48 pages.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ DU PROJET	2
OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE	4
RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS	5
Abondance des espèces et rendements en fourrages.....	5
Composition chimique des racines et production de biomasse racinaire	5
Concentration, stockage et stabilité du carbone dans le sol.....	6
Analyse économique	7
DIFFUSION DES RÉSULTATS	8
APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE	8
POINT DE CONTACT POUR INFORMATION	9
REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS	9
ANNEXE A – HYPOTHÈSES ET DONNÉES POUR L'ANALYSE ÉCONOMIQUE	10
ANNEXE B – TABLEAUX ET FIGURES	11
Liste des tableaux.....	12
Liste des figures	12

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Les objectifs de ce projet étaient de déterminer comment la composition des mélanges fourragers complexes et la régie de paissance simulée mécaniquement affectent (1) les rendements et la valeur nutritive des fourrages, (2) la production de biomasse racinaire et sa composition chimique, (3) les stocks et la stabilité du C dans le sol ainsi que (4) les coûts d'alimentation des animaux. Des parcelles de 1.5 m x 5 m ont été implantées en 2014 à la ferme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Normandin sur une argile limoneuse (pH = 6.8) selon un plan en tiroirs subdivisés une fois (i.e., split-plot). La paissance a été simulée mécaniquement en récoltant les plantes avec une fourragère à chaque fois qu'elles atteignaient 15 cm de hauteur pour le traitement en continu, et lorsqu'elles atteignaient 25 cm pour celui en rotation. Cinq mélanges fourragers complexes étaient à l'étude. Ils combinent tous la luzerne avec des graminées, soit le pâturin des prés, la fétuque élevée, le dactyle pelotonné et le brome des prés (M1), le pâturin des prés, la fétuque des prés et la fléole des prés (M2), le pâturin des prés, la fétuque des prés, la fléole des prés, le brome des prés et l'alpiste roseau (M3), le pâturin des prés, la fétuque élevée, le brome des prés et l'alpiste roseau (M4) ainsi que la fétuque élevée, le brome des prés, l'alpiste roseau et la fétuque rouge traçante (M5). Les rendements et la valeur nutritive des cinq mélanges ont été analysés en 2017, 2018 et 2019 et furent comptabilisés au printemps, durant l'été et à la fin de celui-ci. Les dates de récoltes sont présentées au [Tableau 1](#). Les conditions climatiques des trois saisons de croissance sont présentées au [Tableau 2](#). La densité des espèces dans les cinq mélanges fût évaluée en 2017 et 2018 uniquement ([Tableau 3](#)).

Les mélanges M1, M3 et M4 ont été ciblés pour les analyses des sols et des racines, un choix fait à priori pour maximiser les différences entre les traitements. Les sols ont été échantillonnés à la fin de l'été à 0-20 cm, 20-40 cm et 40-60 cm de profondeur à l'aide d'un carotteur hydraulique monté sur un véhicule tout-terrain. Les racines ont été séparées et triées par lavage dans l'eau. Elles ont été récupérées par flottaison et tamisage (250 µm) avant d'être séchées, pesées et broyées. Leurs concentrations en C et en azote (N) ainsi qu'en composés solubles, hémicellulose, cellulose et lignine furent déterminées. Un échantillon de sol frais a été pesé puis séché à l'étuve afin de calculer la masse volumique apparente. Le sol entier a été séparé en deux fractions: la fraction légère (FL), contenant la matière organique labile non associée aux particules minérales, ainsi que la fraction dense (FD), contenant la matière organique stabilisée sous forme de complexes organo-minéraux (i.e., argilo-humiques). La procédure de fractionnement densimétrique a été effectuée avec de l'iodure de sodium à une densité de 1.6 g cm⁻³. Après agitation du NaI (30 ml) avec le sol (7 g) dans un tube de 50 ml et centrifugation, la FL fût récupérée par flottaison, filtrée, rincée et séchée à l'étuve. La FD demeurée au fond du tube fût aussi filtrée, rincée et séchée à l'étuve. Le sol entier et la FD ont été analysés pour connaître la concentration en C et la signature isotopique δ¹³C. La différence entre le δ¹³C de la FD et du sol entier détermine l'indice de stabilité isotopique Δ¹³C du sol (des [références](#) pertinentes sont présentées plus loin pour celles et ceux souhaitant en apprendre davantage sur le sujet). Une différence positive indique une transformation plus importante par les microorganismes du sol et une stabilisation plus avancée. Les stocks et les concentrations de C du sol entier et des fractions ont été calculés par profondeur. Le stockage dans l'ensemble du profil fût obtenu en additionnant les stocks des trois profondeurs.

Une analyse économique a été réalisée avec la technique du budget partiel en utilisant les coûts variables pour l'implantation des différents mélanges et des types de paissance. Les coûts variables ont été calculés en utilisant et en adaptant les données du feuillet technique AGDEX 130/821 de 2018. Pour évaluer les coûts de la paissance, plusieurs critères techniques ont été déterminés; ces informations peuvent être consultées à l'Annexe A.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS (TABLEAUX ET FIGURES À L'ANNEXE B)

Abondance des espèces et rendements en fourrages

→ *La paissance en rotation et le mélange M5 offrent les meilleurs rendements*

Nos résultats montrent globalement que les rendements en matière sèche des fourrages sont plus élevés avec une paissance en rotation et pour le M5. En 2019, le rendement saisonnier de la paissance en rotation a été un peu plus d'une tonne de matière sèche plus élevé que celui de la paissance en continu ([Tableau 4](#)). Malgré la dégradation du peuplement lors de la troisième année de l'essai, ces résultats démontrent l'importance de la régie de paissance sur le rendement en matière sèche. Les écarts de rendement entre les mélanges ont été faibles malgré la variabilité d'une année à l'autre. Durant l'hiver 2018, les conditions hivernales ont été difficiles. La luzerne de même que la fétuque élevée sont disparues des peuplements. La disparition de la luzerne explique la diminution importante du rendement entre l'année 2017 et les deux autres années ([Tableau 4](#)) malgré une application de 90 kg N ha⁻¹ en 2018 et 2019. Cela démontre l'importance de la luzerne dans les peuplements pour maintenir des rendements plus élevés. La faible pluviométrie de mai à juillet 2018 ainsi qu'en fin de saison en 2019 ([Tableau 2](#)) a aussi contribué aux faibles rendements observés ([Tableau 4](#)), puisque les peuplements étaient composés seulement de graminées lesquelles sont plus sensibles au déficit hydrique ([Tableau 3](#)). De façon générale, la valeur nutritive des différents fourrages, que ce soit pour les paissances ou les mélanges, n'a pas été très élevée (UNT entre 52% et 59%) et les différences sont difficiles à expliquer puisqu'elles ne varient pas toujours dans le même sens, en fonction des traitements et les années ([Tableau 4](#)). Cette variabilité est possiblement reliée à la maturité physiologique de chacune des espèces composant le mélange de même qu'à la densité des espèces qui ont, elles aussi, varié selon les années.

Composition chimique des racines et production de biomasse racinaire

→ *La paissance en rotation a eu un effet positif sur la composition chimique des racines*

→ *Les effets des mélanges sur les racines varient selon le type de paissance*

Le [Tableau 5](#) montre les effets des traitements sur la composition chimique des racines et la production de biomasse racinaire en 2017. Les racines du M3 étaient appauvries en N et présentaient un ratio C/N inférieur par rapport à celles du M4 entre 0-20 cm et 20-40 cm de profondeur ([Fig. 1a-d](#)). Cet effet pourrait être dû à la présence du brome des prés dans le M4, puisque son abondance diminue la concentration en N et augmente la concentration en C et le ratio C/N des racines ([Fig. 2a, c et d](#)). En contrepartie, l'abondance de la luzerne aurait augmenté la concentration en N des racines du M3 entre 20 et 40 cm ([Figure 2b](#)). La paissance en rotation a permis aux racines de s'enrichir en composés solubles au dépend des autres fractions de fibres. Cet effet fût davantage marqué en surface ([Tableau 5; Fig. 3a-d](#)) et pourrait refléter une meilleure accumulation des réserves de croissance sous forme de sucres solubles dans les racines. Enfin les quantités totales de biomasse, de C et d'N racinaires ([Fig. 4a-c](#)) stockées dans l'ensemble du profil (0-60 cm) sont fortement corrélées positivement entre elles ($R = 0.97$; $P < 0.001$). Elles suivent les mêmes tendances et furent plus importantes sous paissance en continu plutôt qu'en rotation pour le M3, mais l'inverse s'est produit pour le M4 alors que la réponse du M1 fût intermédiaire. Les stocks de C racinaires du M1 semblent liés à l'abondance du dactyle ([Fig. 5a, c, e](#)) et ceux du M3 à la fétuque des prés ([Fig. 5b, d, f](#)), alors que ceux du M4 sont difficiles à expliquer.

En 2018, les effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire se sont fait sentir davantage en profondeur ([Tableau 6](#)). Entre 20-40 cm et 40-60 cm, les racines du M4 sous une paissance en rotation étaient enrichies en C par rapport à celles du M1 sous la même régie ([Fig. 6a, b](#)). Suite à la disparition de la luzerne,

ceci pourrait être dû, tout comme en 2017, à l'abondance du brome, laquelle est positivement corrélée à l'accroissement du ratio C/N des racines en profondeur (Fig. 7a, b). Par contre, une proportion plus importante de la biomasse racinaire totale du M1 était distribuée entre 20-40 cm, de sorte que dans cet horizon, les stocks de C et d'N racinaires étaient plus élevés pour le M1 que le M4 sous une paissance en rotation (Fig. 8a, b). Cet effet n'a toutefois pas été assez important pour influencer les quantités totales de biomasse et de C et d'N racinaires stockées dans l'ensemble du profil de sol; celles-ci n'ont pas été affecté par les traitements et représentaient environ 4 000 kg de racines ainsi que 1 500 kg de C racinaire et 55 kg d'N racinaire ha⁻¹ entre 0-60 cm de profondeur. Ces quantités sont moins importantes que celles de l'année précédente, ce qui pourrait s'expliquer par la mortalité de la luzerne.

Les données montrant les effets des traitements sur la composition chimique des racines et la production de biomasse racinaire en 2019 sont présentés au [Tableau 7](#). Les racines des plantes sous une paissance en continu semblent plus riches en N que celles sous une paissance en rotation, particulièrement à 0-20 cm de profondeur où l'effet est significatif (Fig. 9a, c). Toutefois, ce n'est qu'à 20-40 cm de profondeur que le ratio C/N des racines est plus élevé sous une paissance en rotation (Fig. 9b, d). Les racines étaient donc enrichies en C en proportion de l'N qu'elles contiennent. La paissance en rotation a favorisé la production d'une quantité plus importante de biomasse racinaire entre 20-40 cm ([Tableau 7](#)), ce qui a contribué à accroître les stocks de C et d'N racinaires à cette profondeur en comparaison à la paissance en continu (Fig. 10a, b). Lorsque le profil de sol entier est considéré (0-60 cm), les deux modes de paissances stockent des quantités équivalentes, soit ~2 500 et ~90 kg de C et d'N racinaires ha⁻¹, respectivement. Il ne fût pas possible de relier ces effets à des espèces en 2019 puisque leur abondance n'a pas été évaluée.

Concentration, stockage et stabilité du C dans le sol

→ *La paissance en rotation influence positivement la stabilité et le stockage du C dans le sol*

→ *L'effet de la paissance sur le C du sol se fait ressentir à la fois en surface et en profondeur*

Les traitements n'ont pas eu d'effets directs sur les concentrations en C des fractions légère et dense ainsi que celle du sol entier en 2017 ([Tableau 8](#)). Par contre, l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ est plus élevé sous une paissance en rotation qu'en continu, particulièrement entre 0-20 cm et 40-60 cm de profondeur (Fig. 11a, c, d). Ainsi, l'activité de transformation de la matière organique par les microorganismes stabilisant le C dans la fraction dense du sol était plus importante sous une paissance en rotation qu'en continu. L'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ était aussi plus faible pour le M4 entre 0-20 cm de profondeur (Fig. 11b). Le ratio C/N des racines plus élevé (Fig. 1b) et la masse volumique apparente du sol plus importante ([Tableau 8](#)) sous le M4 pourraient donc limiter l'activité de stabilisation de la matière organique par les microorganismes du sol. L'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ est effectivement plus important lorsque les racines sont riches en N (Fig. 12a, b) et il en résulte une augmentation de la concentration en C du sol (Fig. 12c) et une diminution de sa masse volumique apparente (Fig. 12d). Entre 20-40 cm de profondeur, les stocks de C de la fraction dense augmentent avec les quantités de biomasse ($R = 0.67$, $P < 0.01$), de C ($R = 0.63$, $P < 0.01$) et d'N (Fig. 13a) racinaires. Les racines riches en composés solubles affectent aussi positivement les stocks de C de la fraction dense (Fig. 13b), contrairement à celles riches en hémicellulose ($R = -0.55$, $P = 0.03$) et en lignine ($R = -0.43$, $P = 0.09$). Lorsque l'ensemble du profil de sol est considéré, les stocks de C de la fraction légère (i.e., 10 Mg C ha⁻¹), de la fraction dense (i.e., 68 Mg C ha⁻¹) et du sol entier (i.e., 78 Mg C ha⁻¹) sont similaires d'un traitement à l'autre.

En 2018, l'ajout d'engrais azoté pourrait avoir stimulé la décomposition des racines mortes, causant un enrichissement en C dans la fraction légère du sol ([Tableau 9](#)). Ce fût davantage le cas pour le M4 dans les deux premiers horizons du sol et particulièrement en surface sous une paissance en continu (Fig. 14a, b). Cela pourrait être causé par le brome

des prés puisque son abondance est positivement corrélée ($R = 0.60$, $P = 0.04$) à l'enrichissement en C de la fraction légère. L'abondance du brome enrichit les racines en lignine et les appauvrit en composés solubles (Fig. 15). Les fragments de racines sont alors plus difficiles à décomposer et enrichissent la fraction légère du sol, un effet qui se reflète aussi sur la concentration en C du sol entier (Fig. 14c). En 2018 tout comme en 2017, l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ est plus élevé sous une paissance en rotation qu'en continu entre 0-20 cm de profondeur (Fig. 16a). Toutefois, un effet variable est noté selon les années; contrairement à l'année 2017, le M4 présente un indice plus élevé que le M3 en surface en 2018 (Fig. 15b), alors que les deux mélanges ont un indice similaire à 20-40 cm de profondeur (Fig. 15c). Globalement, la présence de racines riches en composés solubles, pauvres en C et faciles à décomposer en surface stimule l'activité biologique et diminue la masse volumique apparente du sol (Fig. 17a-d). On note une relation positive entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et la concentration en C de la fraction dense entre 20-40 cm, ($R = 0.56$, $P = 0.02$). Les effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C de la fraction dense du sol en 2018 (Tableau 9, Fig. 18) ressemblent à ceux observés en 2017 sur les stocks de biomasse et de C et d'N racinaires. Les stocks de C stable sont plus importants sous une paissance en rotation pour le M4 et sous une paissance en continu pour le M3, alors que la réponse du M1 demeure intermédiaire à celle des deux autres mélanges (Fig. 18 a-d). La luzerne ayant survécu à l'hiver 2018 contribue de manière significative au stockage du C dans la fraction dense à la fois à 40-60 cm de profondeur ($R = 0.74$, $P < 0.01$) et dans tout le profil de sol ($R = 0.50$, $P = 0.03$).

En 2019, il y a eu un effet marqué de la paissance sur les concentrations et les stocks de C du sol et des fractions dans les trois horizons (Tableau 10). La paissance en rotation a accru les concentrations en C du sol entier et de la fraction dense entre 20-40 cm de profondeur (Fig. 19a, b), et principalement pour le M1 et le M3 entre 40-60 cm de profondeur (Fig. 19c). L'apport d'une quantité importante de racines enrichies en N ayant un ratio C/N faible a stimulé l'activité des microorganismes et augmenté l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$, ce qui a enrichi en C la fraction dense du sol (Fig. 20a, b). L'impact positif de la paissance en rotation s'est aussi reflété sur les stocks de C du sol entier et la fraction dense entre 0-20 cm, 20-40 cm et dans l'ensemble du profil de sol (i.e., 0-60 cm), lesquels furent près de 30% plus élevés que ceux sous une paissance en continu (Fig. 21a-c).

Analyse économique

→ Globalement, le système de paissance en rotation est le moins dispendieux

Le coût d'implantation des différents mélanges a varié de 853 \$ ha⁻¹ pour le M2 à 935 \$ ha⁻¹ pour le M1 (Tableau 11). Peu importe le mélange semé, la semence représente en moyenne 30% des coûts variables totaux. Les coûts variables totaux par hectare ont été plus bas pour la paissance en rotation que pour celle en continu (Tableau 12). Pour la durée de l'essai, la moyenne a été de 285\$ ha⁻¹ pour la paissance en rotation et de 333\$ ha⁻¹ pour celle en continu. En 2017, bien qu'aucune fertilisation azotée n'ait été faite, la fertilisation phosphatée et potassique compte pour 60% des coûts variables totaux. En 2018 et 2019, l'augmentation des coûts variables totaux est reliée à l'ajout de 79 kg N ha⁻¹ et à la stratégie de location des terres, puisque le rendement en matière sèche des pâturages n'était pas suffisant pour assurer les besoins du troupeau de 117 vaches. Le besoin de location de terres pour la paissance en continu est plus important que celui de la paissance en rotation, parce que les pertes reliées à la paissance en continu sont estimées à 40% comparativement à 15% pour la paissance en rotation. Lorsque les coûts totaux variables sont rapportés en matière sèche (TMS) ha⁻¹, le système de paissance en rotation demeure moins dispendieux (Tableau 12). Pour la durée de l'essai, le coût par TMS ha⁻¹ pour la paissance en rotation a été de 109 \$ alors qu'il fût de 191\$ ha⁻¹ pour celle en continu (Tableau 12).

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Les résultats ont été ou seront diffusés dans le cadre des activités suivantes :

Titre de l'événement	Date et lieu	Participants	Public cible ¹
1. Cours AGR7140 – Les sols et les systèmes fourragers enseigné à l'UQAT	Session Hiver 2019, À distance	14	Scientifique et technique
2. Journée bovine régionale	05 Mars 2019, Rouyn-Noranda	40	Technique
3. Colloque Profitable Pasture 2019	10 mars 2019, Mount Forest, Ontario	150	Technique
4. 13e Colloque annuel de la Société québécoise de phytotechnologie	02 Mai 2019, Montréal	75	Scientifique
5. 33e Congrès annuel de l'Association québécoise de spécialistes en sciences du sol	13 juin 2019, Duhamel-Ouest	65	Scientifique et technique
6. Cours AGR7125 – Les pâturages en productions animales enseigné à l'UQAT	Session Automne 2019, À distance	12	Scientifique et technique
7. Publication du Rapport final sur Agri-Réseau	Soumission prévue à la mi-juillet 2020	NA	Scientifique et technique
8. Article pour publication dans une revue scientifique avec comité de lecture	Soumission prévue le 15 juillet 2020	NA	Scientifique
9. Mémoire de maîtrise de Hiba Benmohamed	Dépôt initial prévu le 15 août 2020	NA	Scientifique
10. Article de vulgarisation dans une revue ou un journal d'actualités agricoles	À déterminer	NA	Technique
11. Webinaire	Fin novembre 2020	50	Scientifique et technique

¹ Le public « technique » est composé principalement de producteurs agricoles, d'agronomes et de conseillers, alors que le public « scientifique » est composé principalement de professeurs, de chercheurs et d'étudiants à la maîtrise et au doctorat.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Nos résultats montrent l'importance d'avoir de bons rendements pour diminuer les coûts de matière sèche des fourrages provenant des pâturages. En ce sens, la paissance en rotation devrait être privilégiée. Les pertes de matières sèches au pâturage y sont plus faibles et cette régie de paissance produit des rendements plus élevés, ce qui diminue les coûts par TMS ha⁻¹, un critère très important pour les producteurs de veaux d'embouche. De plus, la paissance en rotation permet aux plantes de produire une biomasse racinaire plus abondante et plus facilement décomposable, ce qui stimule l'activité microbienne, diminue la masse volumique apparente et augmente le stockage du C. La paissance en rotation contribue donc globalement à améliorer la santé des sols. La présence de la luzerne dans le mélange contribue à la fertilisation azotée. Le cultivar utilisé (CRS-1001) a été développé spécifiquement pour la paissance. Dans cet essai, les différences de rendement entre les mélanges fourragers complexes n'ont pas été très importantes. Toutefois, le mélange M5 a généralement donné des rendements supérieurs d'une année à l'autre. Ceci est possiblement relié à la prévalence du brome des prés et à la fétuque rouge traçante. Selon la littérature scientifique, la fétuque rouge traçante cv. Boréal est une espèce bien adaptée aux conditions fraîches et pluvieuses des régions nordiques.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Vincent Poirier, PhD
Professeur en sciences du sol et stockage du carbone
Unité de recherche et développement en agriculture et agroalimentaire (URDAAT)
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)
79, rue Côté, Notre-Dame-du-Nord (QC), J0Z 3B0
1-819-762-0971 vincent.poirier@uqat.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Les auteurs tiennent à remercier l'organisme Agriculture Nordique pour la Production Bovine (ANPB) pour son implication financière. La réalisation de ce projet fût rendue possible en vertu du volet 4 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du MAPAQ par l'entremis du Fonds vert. La contribution des équipes de recherche de la Station de recherche en agriculture et agroalimentaire de l'UQAT à Notre-Dame-du-Nord et de la Ferme expérimentale d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Normandin fût grandement appréciée.

RÉFÉRENCES PERTINENTES SUR LE C DANS LE SOL ET SES FRACTIONS

Cotrufo et al. (2013) The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology* 19:988-995 (doi: 0.1111/gcb.12113).

Cotrufo et al. (2015) Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience* 8:776-779 (doi: 10.1038/ngeo2520).

Golchin et al. (1994) Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research* 32:1043-1068.

Gunina et Kuzyakov (2014) Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from ¹³C natural abundance. *Soil Biology and Biochemistry* 71:95-104 (doi: 10.1016/j.soilbio.2014.01.011)

Poirier et al. (2018) The root of the matter: linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry* 120:246-259 (doi: 10.1016/j.soilbio.2018.02.016)

Poirier et al. (2020) Organo-mineral interactions are more important for organic matter retention in subsoil than topsoil. *Soil Systems* 4:4 (doi: 10.3390/soilsystems4010004)

Schmidt et al. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478:49-56 (doi: 10.1038/nature10386)

von Lützow et al. (2006) Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science* 57:426-445 (doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x)

ANNEXE A – HYPOTHÈSES ET DONNÉES POUR L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

Tableau A1: Hypothèses et données techniques utilisées pour effectuer l'analyse des coûts de paissance à l'hectare.

Paramètre	Description et commentaires
Ferme-type	Ferme moyenne utilisée pour le programme de l'ASRA de la dernière analyse de 2015 composée de 117 vaches et d'une superficie de 80 hectares pour les pâturages, soit l'équivalent de 1,5 vaches/ha
Vache-type	Vache d'un poids de 650 kg, issue d'un croisement triple dont la lignée paternelle est Charolaise et la lignée maternelle est issue d'un croisement Angus-Simmental
Longueur de la saison de paissance	Déterminée en utilisant la saison sans gel mortel (-2°C) et les dates de prélèvement durant l'essai.
Calcul de la production des fumiers à la ferme	Données moyennes utilisées par les conseillers en agroenvironnement : <ul style="list-style-type: none"> - Une vache produit en moyenne 15 m³ de fumier/année et la densité du fumier est de 0,75 tonne/m³. - L'analyse moyenne des fumiers est de 4.8 kg N/tonne, 2.4 kg P₂O₅/tonne et 4.92 kg K₂O/tonne. - La disponibilité des éléments des fumiers est de 40% pour le N, 65% pour le P₂O₅ et 90% pour le K₂O. - Les besoins en fertilisants ont été calculés à partir de la production des fumiers la ferme-type (voir plus haut).
Pertes de fourrages selon le mode de paissance	D'après Christen (2001), les pertes de l'ordre de 40% pour la paissance en continu et de 15% pour celle en bande. La paissance en bande doit nécessairement se faire dans des parcelles en rotation.
Consommation volontaire de la matière sèche (CVMS) des vaches	La CVMS varie selon la valeur nutritive (UNT) des fourrages. D'après NRC (2016, page 168), la CVMS en % de poids vif pour des vaches allaitantes est de: <ul style="list-style-type: none"> - 2.2% lorsque les UNT sont < 52; - 2.5% lorsque les UNT sont entre 52 et 59; - 2.7 % lorsque les UNT sont > 59. Les UNT utilisées sont celles déterminées lors de l'essai.
Coûts pour les approvisionnements tel que mentionnés dans la référence économique AGDEX130/821 de 2018	Une seule entreprise fût consultée pour fixer les coûts des semences certifiées, des engrais et des herbicides. Les semences ne sont pas nécessairement celles des cultivars utilisés, sauf pour la fétuque rouge traçante et le pâturin des prés. Les type d'engrais sont ceux utilisés pour l'essai en parcelles. Le coût de la chaux est celui en vigueur au Saguenay-Lac St-Jean, soit 55\$/tonne incluant le transport.

Tableau A1: (suite)

Coûts des opérations culturales	Les coûts utilisés sont ceux mentionnés dans la référence économique AGDEX130/821 de 2018
Autres coûts	<p>Les autres coûts considérés sont ceux mentionnés dans la référence économique AGDEX130/821 de 2018, mais les modifications suivantes ont été apportées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Location de terres : Un coût moyen de 60\$/ha a été utilisé tel que déterminé lors de l'analyse comparative provinciale sur les pâturages d'après les données Agritel tirées de l'AGDEX 130/891 de 2019. - Clôtures: Le % d'utilisation a été augmenté à 1.6% pour la paissance en rotation-bande et diminué à 1% pour la paissance en continu.
Coût par tonne matière sèche au pâturage	Le calcul a été fait en utilisant les rendements des types de paissance obtenus à partir de l'essai.

Références citées dans le tableau :

Christen, A.-M (2001) Utilisation du pâturage en bandes pour les bovins de boucherie-Élevage Vache-Veau. Mémoire présenté dans le cadre du cours PTT-20728 – Système fourragers pour les bovins, Université Laval, 21 pages.

National Research Council (NRC). 2016. Nutrient Requirements of Beef Cattle, 8th edition, National Academy Press, Washington, D.C.

ANNEXE B – TABLEAUX ET FIGURES

Liste des tableaux

Tableau 1: Dates de récolte des fourrages pour simuler les modes de paissance.	16
Tableau 2: Données météorologiques durant la saison de croissance entre 2017 et 2019 à la ferme expérimentale de Normandin.....	17
Tableau 3: Densité de chacune des espèces retrouvées dans les cinq mélanges et les deux modes de paissance en 2017 et 2018.	18
Tableau 4: Rendements et valeur nutritive (UNT) des fourrages entre 2017 et 2019.....	19
Tableau 5: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2017.....	20
Tableau 6: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2018.....	26
Tableau 7: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2019.....	30
Tableau 8: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2017.....	33
Tableau 9: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2018.....	37
Tableau 10: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2019.....	43
Tableau 11 : Résumé du coût d'implantation des différents mélanges fourragers complexes pour un hectare.	47
Tableau 12. Résumé des coûts variables pour les types de paissance (rotation et continu) et des coûts par tonne de matière sèche (TMS) par hectare des pâturages pour les années 2017, 2018 et 2019.	48

Liste des figures

- Figure 1: Concentration en azote (N) et ratio carbone / azote (C/N) des racines des mélanges M1, M3 et M4 entre 0-20 cm (a et b) et 20-40 cm (c et d). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.21
- Figure 2: Relations entre l'abondance du brome des prés et de la luzerne dans les parcelles en 2017 et la concentration en carbone des racines entre 0-20 cm de profondeur (a) ainsi que la concentration en azote (b, c) et le ration C/N (d) des racines entre 20-40 cm de profondeur.....22
- Figure 3: Influence de la paissance en continu et en rotation sur les concentrations en fibres solubles (a), en hémicellulose (b), en cellulose (c) et en lignine (d) des racines retrouvées entre 0 et 20 cm de profondeur. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....23
- Figure 4: Quantités totales de biomasse racinaire (a), de carbone racinaire (b) et d'azote racinaire (c) stockées dans l'ensemble du profil de sol (0-60 cm) pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en continu (C) et en rotation (R). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.24
- Figure 5: Influence de l'abondance du dactyle pelotonné dans le mélange 1 (M1) et de la fétuque des prés dans le mélange 3 (M3) sur les quantités de biomasse racinaire (a, b) et de carbone (c, d) et d'azote (e, f) stockées dans l'ensemble du profil (0-60 cm) des sols sous une paissance en continu et en rotation en 2017.25
- Figure 6: Concentration en carbone des racines des mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en rotation et en continu en 2018 à 20-40 cm (a) et 40-60 cm (b) de profondeur dans le sol. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....27
- Figure 7: Impact de l'abondance du brome des prés sur le ratio carbone/azote (C/N) des racines des mélanges M1 et M4 sous une paissance en continu et en rotation entre 20-40 cm (a) et 40-60 cm (b) de profondeur dans le sol en 2018.28
- Figure 8: Stock de carbone racinaire (a) et d'azote racinaire (b) retrouvés entre 20-40 cm de profondeur dans le sol en 2018 pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en rotation et en continu. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.29
- Figure 9: Influence de la paissance en continu et en rotation sur la concentration en azote (N) et le ratio carbone/azote (C/N) des racines retrouvées entre 0-20 cm (a, b) et 20-40 cm (c, d) en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....31

Figure 10: Quantités de carbone (C) racinaire (a) et d'azote (N) racinaire stockées à 20-40 cm de profondeur pour les traitements de paissance en continu et en rotation. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.	32
Figure 11: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur l'indice isotopique delta (Δ) ^{13}C du sol entre 0-20 cm (a, b), 20-40 cm (c) et 40-60 cm (d) de profondeur en 2017. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....	34
Figure 12: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et la concentration en azote (a) et le ratio C/N (b) des racines, ainsi qu'avec la concentration en carbone (c) et la masse volumique apparente (d) entre 0-20 cm pour les mélanges et les modes de paissance en 2017.....	35
Figure 13: Influence des stocks d'azote racinaire (a) et de la concentration en composés solubles des racines (b) sur les stocks de carbone de la fraction dense en 20-40 cm de profondeur pour les deux modes de paissance et les trois mélanges étudiés en 2017.....	36
Figure 14: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur la concentration en carbone de la fraction légère entre 0-20 cm (a) et 20-40 cm (b) ainsi que du sol entier entre 20-40 cm (c) de profondeur en 2018. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....	38
Figure 15: Impact de l'abondance du brome des prés sur la concentration en composés solubles (a) et en lignine (b) des racines des mélanges M1 et M4 sous une régie de paissance en continu et en rotation entre 0-20 cm de profondeur en 2018.....	39
Figure 16: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur l'indice isotopique delta (Δ) ^{13}C du sol entre 0-20 cm (a, b) et 20-40 cm de profondeur (c) en 2018. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.....	40
Figure 17: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et les concentrations en composés solubles (a) et en carbone (b) des racines et la masse volumique apparente du sol (c), ainsi qu'entre la masse volumique apparente et la concentration en composés solubles des racines entre 0-20 cm de profondeur pour mélanges M1, M3 et M4 sous une paissance en continu et en rotation en 2018.....	41
Figure 18: Quantité de carbone stocké dans la fraction dense (i.e., stable) du sol pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en continu et en rotation entre 0-20 cm (a), 20-40 cm (b) et 40-60 cm (c) de profondeur ainsi que pour l'ensemble du profil de sol (i.e., 0-60 cm) (d). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.	42

Figure 19: Concentration en carbone de la fraction dense (a) et du sol entier (b) en 2019 pour la paissance en continu et en rotation entre 20-40 cm de profondeur, et effet d'interaction entre la paissance et les mélanges sur la concentration en carbone du sol entier entre 40-60 cm de profondeur (c). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.44

Figure 20: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et le ratio C/N des racines (a) ainsi qu'entre les stocks de N racinaires et la concentration en carbone de la fraction dense du sol (b) entre 40-60 cm de profondeur pour les mélanges M1, M3 et M4 sous une paissance en continu et en rotation en 2019.45

Figure 21: Quantités de carbone stocké dans la fraction dense et dans le sol entier sous une paissance en continu et en rotation en 2019 entre 0-20 cm (a) et 20-40 cm (b, c) de profondeur ainsi que dans l'ensemble du profil de sol (i.e., 0-60 cm) (d). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.46

Tableau 1: Dates de récolte des fourrages pour simuler les modes de paissance.

Paissance	Coupe	Saison 2017	Saison 2018	Saison 2019
Rotation	1	5 juin	15 juin	17 juin
	2	22 juin	26 juin	8 juillet
	3	17 juillet	30 juillet	25 juillet
	4	7 août	20 août	---
	5	11 septembre	13 septembre	---
Continu	1	2 juin	6 juin	12 juin
	2	20 juin	15 juin	25 juin
	3	12 juillet	22 juin	8 juillet
	4	31 juillet	5 juillet	22 juillet
	5	21 août	30 juillet	12 août
	6	25 septembre	14 août	---
	7	---	7 septembre	---
	8	---	20 septembre	---

Printemps :  Été :  Fin d'été : 

Tableau 2: Données météorologiques durant la saison de croissance entre 2017 et 2019 à la ferme expérimentale de Normandin.

Mois	Température moyenne (°C)				Précipitations (mm)				Jours avec précipitations (nb)				Degrés-jours 5 °C (nb)			
	2017	2018	2019	Moy. ^Z	2017	2018	2019	Moy. ^Z	2017	2018	2019	Moy. ^Z	2017	2018	2019	Moy. ^Y
Mai	9.9	8.4	7.4	9.0	123	40	90	70	16	8	8	12	146	93	89	140
Juin	14.7	14.5	13.6	14.6	137	39	80	81	14	6	11	13	289	274	261	285
Juillet	16.1	20.0	18.8	17.2	135	60	34	106	20	9	7	15	333	471	428	381
Août	15.2	17.6	16.3	15.7	115	138	64	89	20	9	7	14	321	374	350	340
Septembre	13.2	11.8	10.2	10.9	91	183	44	92	11	10	9	13	228	220	169	186
Octobre	7.4	1.7	4.9	4.8	89	91	49	68	8	13	6	12	93	9	23	44

^Z Moyenne de 83 ans (1937 – 2019). ^Y Moyenne de 44 ans (1976 – 2019).

Tableau 3: Densité de chacune des espèces retrouvées dans les cinq mélanges et les deux modes de paissance en 2017 et 2018.

		Luzerne	Pâturin des prés	Fétuque élevée	Fétuque des prés	Fétuque rouge traçante	Dactyle pelotonné	Brome des prés	Fléole des prés	Alpiste roseau	Autres espèces
		(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)	(plant m ⁻²)
2017											
Continu	M1	44 (0)	0 (0)	37 (1)	-	-	8 (3)	10 (2)	-	-	39 (2)
	M2	44 (0)	0 (0)	-	39 (3)	-	-	-	2 (1)	-	42 (1)
	M3	45 (0)	0 (0)	-	40 (1)	-	-	-	5 (1)	0 (0)	43 (1)
	M4	45 (0)	0 (0)	36 (2)	-	-	-	9 (1)	-	0 (0)	41 (1)
	M5	45 (0)	-	34 (1)	-	42 (2)	-	9 (1)	-	0 (0)	39 (2)
Rotation	M1	44 (0)	0 (0)	30 (3)	-	-	5 (1)	6 (1)	-	-	43 (1)
	M2	44 (0)	0 (0)	-	32 (2)	-	-	-	4 (1)	-	43 (1)
	M3	44 (0)	0 (0)	-	29 (4)	-	-	-	3 (1)	0 (0)	43 (1)
	M4	44 (0)	0 (0)	27 (3)	-	-	-	9 (2)	-	0 (0)	44 (0)
	M5	45 (0)	-	23 (2)	-	44 (1)	-	6 (2)	-	0 (0)	44 (0)
2018											
Continu	M1	4 (2)	3 (2)	8 (3)	-	-	4 (2)	26 (5)	-	-	43 (1)
	M2	4 (2)	2 (1)	-	23 (6)	-	-	-	15 (4)	-	44 (0)
	M3	6 (2)	2 (2)	-	22 (6)	-	-	-	11 (3)	0 (0)	44 (0)
	M4	2 (1)	4 (1)	4 (2)	-	-	-	25 (4)	-	1 (1)	43 (1)
	M5	2 (0)	-	1 (1)	-	44 (0)	-	15 (1)	-	2 (1)	43 (1)
Rotation	M1	2 (1)	13 (3)	11 (3)	-	-	4 (3)	24 (5)	-	-	45 (0)
	M2	4 (1)	14 (3)	-	22 (4)	-	-	-	13 (2)	-	44 (0)
	M3	6 (1)	16 (1)	-	21 (3)	-	-	-	11 (2)	2 (1)	45 (0)
	M4	5 (2)	17 (2)	8 (3)	-	-	-	18 (4)	-	2 (1)	45 (0)
	M5	6 (1)	-	6 (1)	-	43 (2)	-	18 (4)	-	1 (1)	40 (3)

Note : Les valeurs entre parenthèse représentent l'écart-type de la moyenne. Puisque les valeurs sont arrondies à l'unité, celles des moyennes et écart-types inférieures à 0.5 sont notées « 0 ».

Tableau 4: Rendements et valeur nutritive (UNT) des fourrages entre 2017 et 2019.

	UNT (% MS)			Rendement (kg MS ha ⁻¹)			Saison*
	Printemps	Été	Fin été	Printemps	Été	Fin été	
2017							
Paissance							
Continu	56 a	56 a	54 b	2119 a	1394 a	231 b	3744 b
Rotation	56 a	56 a	56 a	2108 a	1498 a	409 a	4015 a
Écart	0	0	2	11	104	178	271
Mélange							
M1	56 b	54 c	53 c	2099 a	1516 a	326 b	3940 a
M2	56 b	57 a	56 a	2216 a	1324 b	267 b	3807 a
M3	55 b	57 a	56 a	2209 a	1416 b	329 b	3954 a
M4	57 a	57 a	55 ab	1958 a	1381 b	296 b	3635 a
M5	57 a	55 b	54 bc	2085 a	1594 a	382 a	4062 a
Écart	2	3	3	258	270	115	427
2018							
Paissance							
Continu	56 a	49.4 b	53.1 a	286 b	729 b	531 a	1546 b
Rotation	57 a	51.7 a	52.8 a	547 a	1121 a	567 a	2230 a
Écart	0.9	2.3	0.5	261	392	36	684
Mélange							
M1	57 a	50 b	52 bc	287 c	961 b	501 b	1783 b
M2	57 a	52 a	54 a	393 b	730 c	546 b	1669 b
M3	57 a	52 a	54 a	434 b	790 c	501 b	1724 b
M4	57 a	51 a	53 b	340 bc	901 b	517 b	1758 b
M5	54 b	49 c	52 c	623 a	1245 a	693 a	2508 a
Écart	3	3	3	336	515	192	839
2019							
Paissance							
Continu	58 b	56.0 a	ND	804 b	892 b	ND	1695 b
Rotation	61 a	54.1 b	ND	1277 a	1443 a	ND	2712 a
Écart	3	1.9		473	551		1017
Mélange							
M1	60 a	55 b	ND	948 b	1102 b	ND	2049 c
M2	61 a	57 a	ND	1194 a	1070 b	ND	2214 abc
M3	61 a	56 a	ND	1107 a	1155 ab	ND	2262 ab
M4	59 a	55 b	ND	857 b	1258 a	ND	2115 bc
M5	57 b	53 c	ND	1114 a	1269 a	ND	2379 a
Écart	4	4		337	199		330

Note: À l'intérieur de chacune des périodes analysées, des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes des modes de paissance ou des mélanges diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

* Les rendements de chaque période ont été cumulés pour calculer les rendements totaux pour toute la saison de croissance.

Tableau 5: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2017.

		Concentration en carbone (C)	Concentration en azote (N)	Ratio C/N	Concentration en fibres			Distribution des racines	Stock de racines	Stock de C racinaire	Stock de N racinaire	
		(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	-	Soluble (mg g ⁻¹)	Hémicellulose (mg g ⁻¹)	Cellulose (mg g ⁻¹)	Lignine (mg g ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
0-20 cm												
Continu	M1	359 (22)	12.3 (1.0)	28.8 (4.0)	454 (46)	293 (23)	128 (13)	185 (17)	74 (13)	7953 (1260)	2891 (547)	98 (20)
	M3	384 (02)	13.2 (0.4)	29.1 (0.8)	471 (22)	230 (21)	119 (5)	179 (7)	84 (3)	10081 (1890)	3863 (702)	133 (24)
	M4	367 (14)	11.1 (0.6)	33.3 (1.2)	483 (56)	216 (33)	121 (2)	180 (25)	84 (7)	7405 (813)	2730 (373)	82 (9)
Rotation	M1	394 (17)	12.8 (0.3)	30.8 (1.3)	522 (15)	177 (9)	101 (10)	201 (21)	89 (3)	10311 (1855)	4053 (694)	131 (21)
	M3	390 (18)	13.3 (0.5)	29.3 (1.0)	548 (8)	183 (8)	109 (5)	153 (7)	82 (8)	6357 (1608)	2510 (719)	84 (22)
	M4	412 (27)	11.7 (0.5)	35.6 (3.0)	538 (19)	187 (9)	128 (25)	146 (41)	79 (8)	10274 (2298)	4243 (1035)	122 (31)
	<i>P_P</i>	0.17	0.26	0.46	0.06	0.01	0.04	0.23	0.72	0.68	0.69	0.67
	<i>P_M</i>	0.39	<0.001	0.04	0.80	0.62	0.94	0.33	0.84	0.80	0.94	0.82
	<i>P_{PxM}</i>	0.72	0.38	0.74	0.52	0.65	0.70	0.33	0.51	0.10	0.10	0.05
20-40 cm												
Continu	M1	396 (14)	12.2 (1.3)	33.5 (5.2)	482 (8)	194 (20)	144 (14)	179 (05)	22 (11)	2389 (1278)	925 (470)	30 (17)
	M3	410 (20)	14.7 (0.4)	27.9 (1.4)	420 (61)	222 (32)	156 (21)	202 (52)	14 (3)	1581 (312)	642 (112)	23 (5)
	M4	403 (18)	11.2 (1.4)	37.8 (6.4)	485 (10)	194(12)	129 (20)	193 (24)	12 (5)	1285 (684)	504 (253)	16 (10)
Rotation	M1	385 (21)	13.1 (0.6)	29.5 (1.5)	492 (nd)	214 (nd)	139 (nd)	155 (nd)	6 (1)	652 (76)	249 (22)	8 (1)
	M3	395 (13)	14.7 (2.1)	28.4 (5.5)	587 (nd)	149 (nd)	123 (nd)	141 (nd)	13 (7)	1168 (767)	451 (287)	18 (13)
	M4	415 (19)	11.6 (0.6)	36.2 (3.5)	503 (33)	186 (27)	110 (13)	201 (18)	16 (6)	1796 (485)	731 (186)	21 (6)
	<i>P_P</i>	0.86	0.61	0.87	0.05	0.43	0.05	0.26	0.40	0.38	0.38	0.15
	<i>P_M</i>	0.15	0.01	0.01	0.74	0.53	0.18	0.27	0.87	0.82	0.82	0.94
	<i>P_{PxM}</i>	0.07	0.47	0.39	0.28	0.43	0.16	0.43	0.41	0.32	0.32	0.18
40-60 cm												
Continu	M1	411 (08)	11.5 (1.1)	36.4 (4.3)	238 (nd)	215 (nd)	196 (nd)	350 (nd)	4 (2)	494 (202)	200 (79)	6 (3)
	M3	410 (10)	11.5 (1.0)	36.1 (2.8)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	2 (1)	260 (28)	106 (9)	3 (0)
	M4	400 (22)	15.8 (2.8)	27.1 (5.2)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	3 (1)	347 (167)	146 (73)	5 (2)
Rotation	M1	420 (12)	11.8 (2.4)	38.3 (7.0)	nd (nd)	nd (nd)	138 (nd)	213 (nd)	4 (1)	460 (94)	191 (35)	6 (2)
	M3	408 (04)	14.2 (1.8)	30.0 (4.5)	505 (nd)	175 (nd)	144 (nd)	175 (nd)	5 (1)	369 (178)	151 (73)	5 (3)
	M4	419 (13)	14.6 (0.8)	29.0 (2.4)	468 (nd)	186 (nd)	141 (23)	206 (nd)	5 (2)	527 (120)	218 (44)	8 (2)
	<i>P_P</i>	0.54	0.21	0.54	nd	nd	nd	nd	0.73	0.71	0.54	0.26
	<i>P_M</i>	0.42	0.10	0.34	nd	nd	nd	nd	0.84	0.58	0.42	0.70
	<i>P_{PxM}</i>	0.56	0.65	0.90	nd	nd	nd	nd	0.61	0.43	0.56	0.37

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la paissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

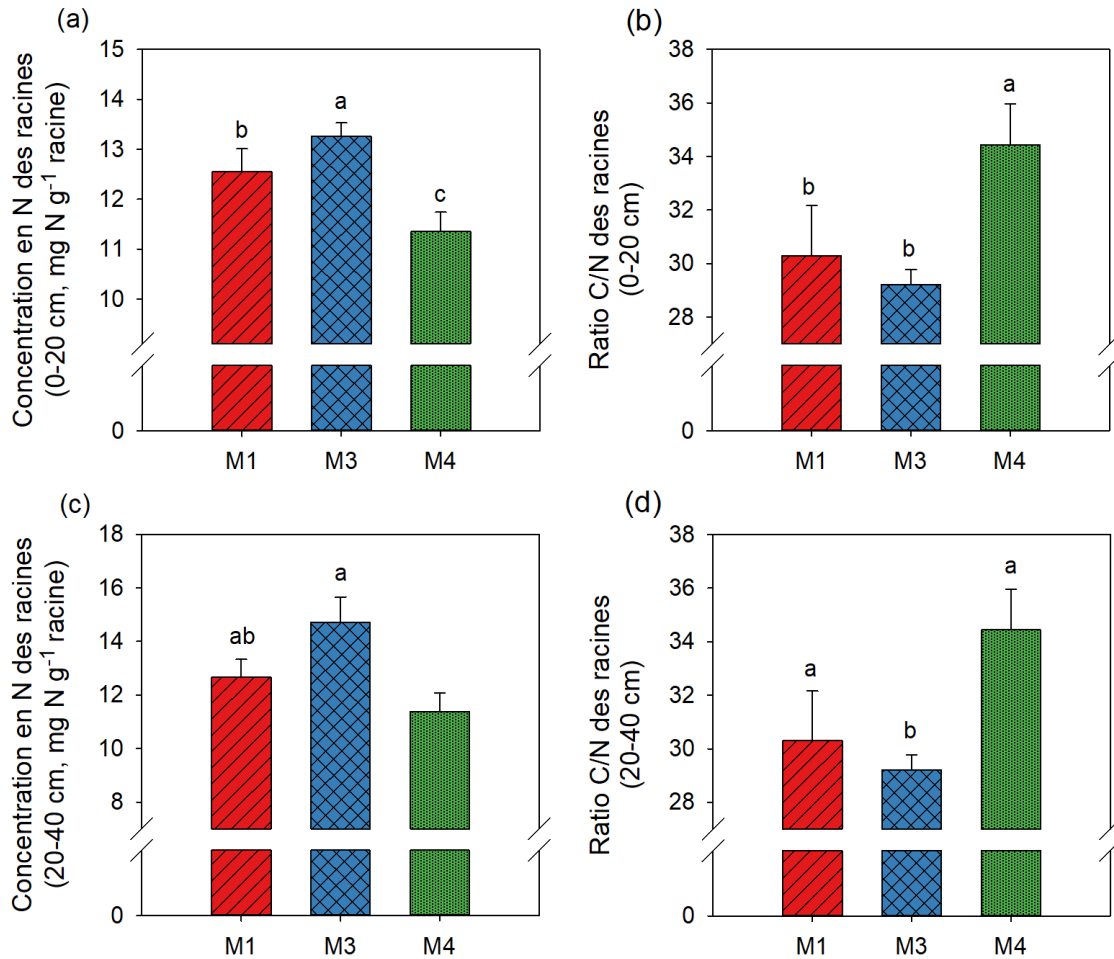


Figure 1: Concentration en azote (N) et ratio carbone / azote (C/N) des racines des mélanges M1, M3 et M4 entre 0-20 cm (a et b) et 20-40 cm (c et d). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

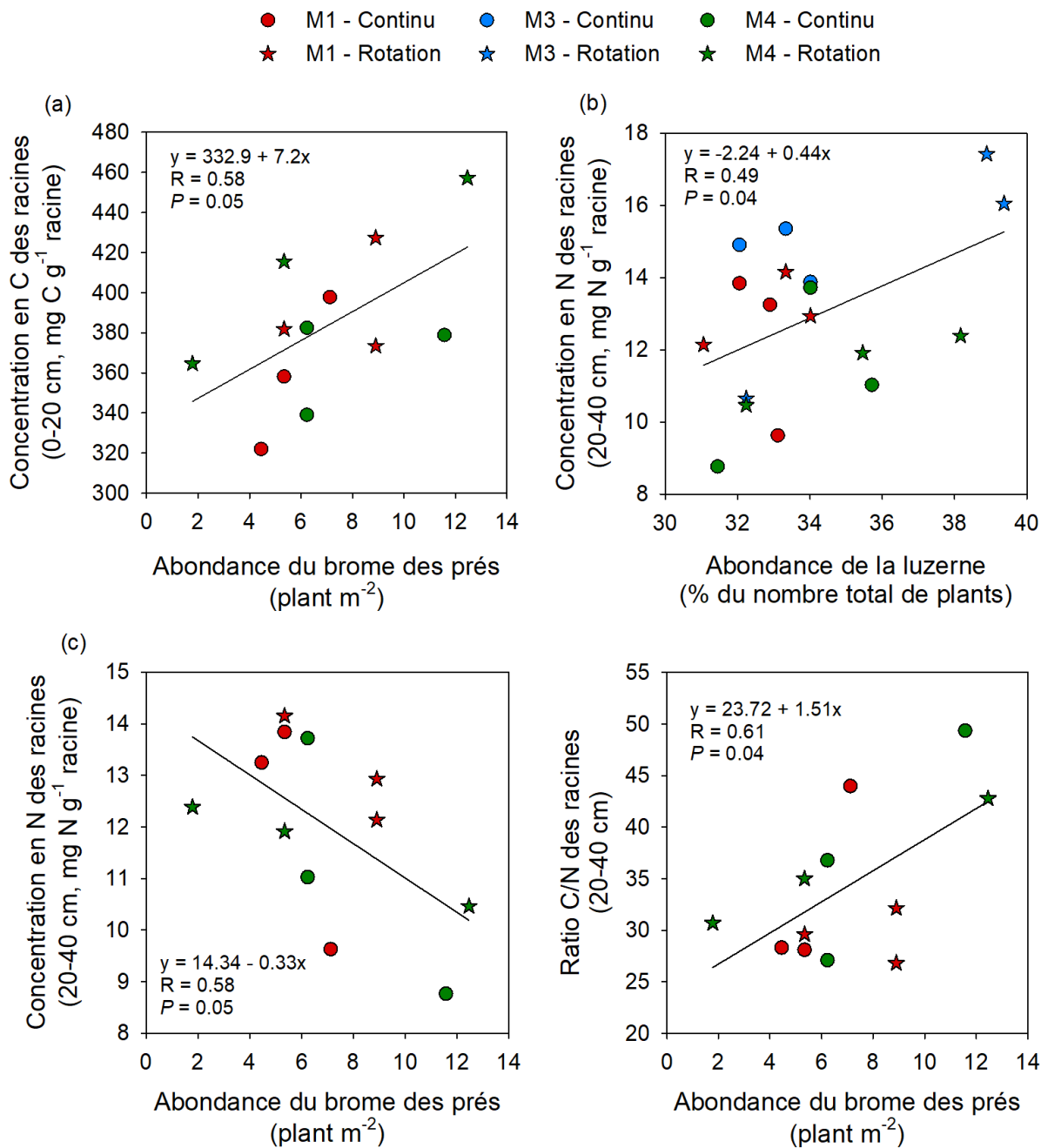


Figure 2: Relations entre l'abondance du brome des prés et de la luzerne dans les parcelles en 2017 et la concentration en carbone des racines entre 0-20 cm de profondeur (a) ainsi que la concentration en azote (b, c) et le ration C/N (d) des racines entre 20-40 cm de profondeur.

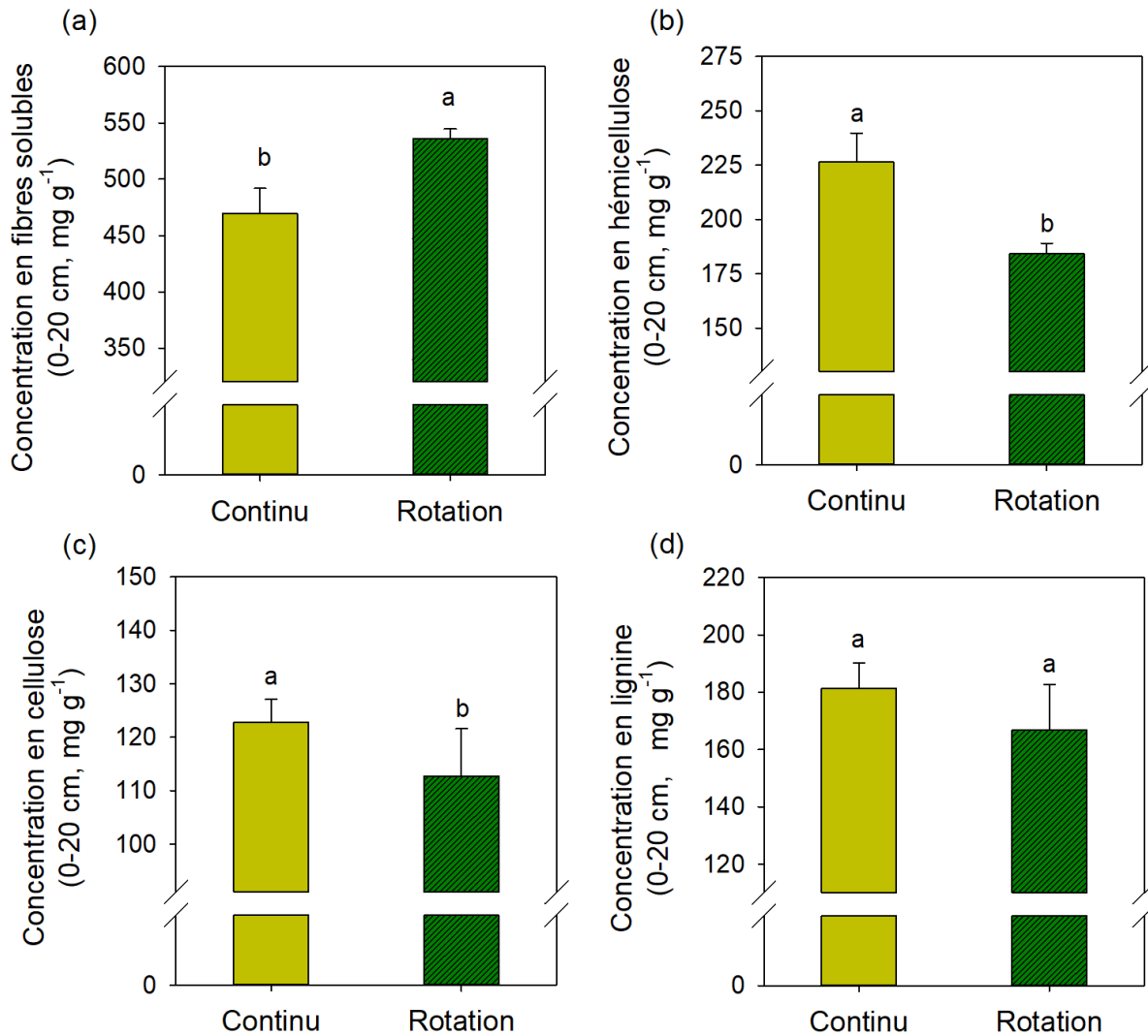


Figure 3: Influence de la paissance en continu et en rotation sur les concentrations en fibres solubles (a), en hémicellulose (b), en cellulose (c) et en lignine (d) des racines retrouvées entre 0 et 20 cm de profondeur en 2017. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

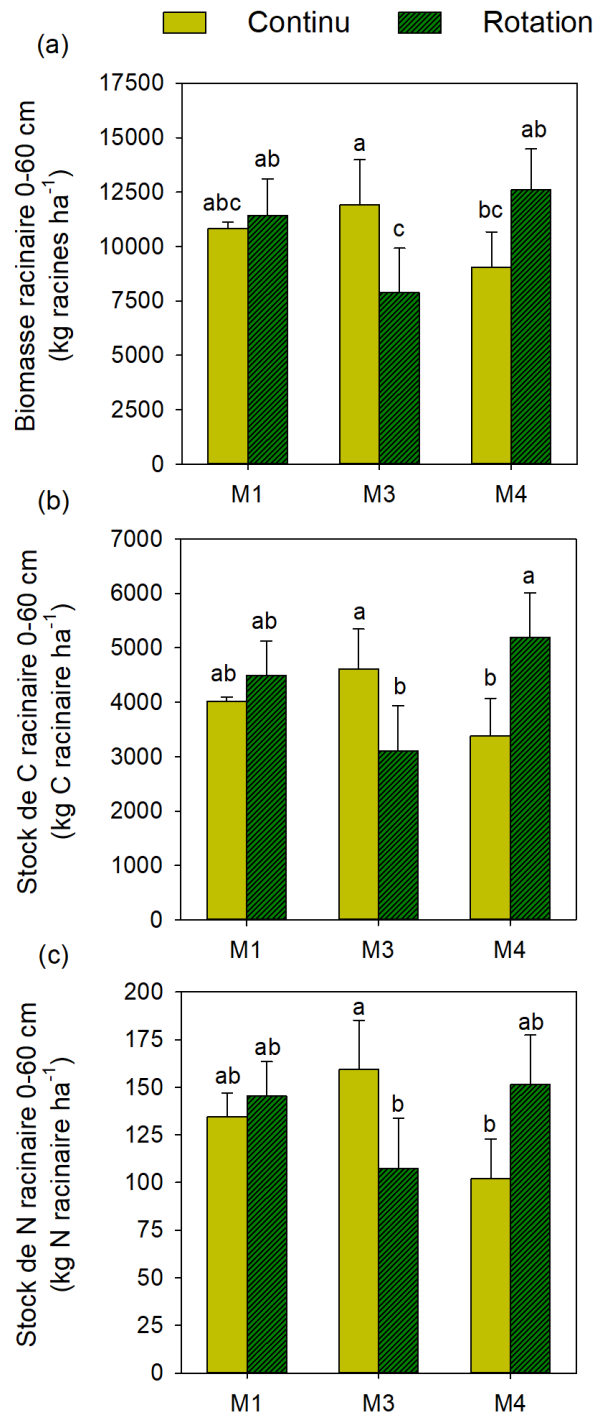


Figure 4: Quantités totales de biomasse racinaire (a), de carbone racinaire (b) et d'azote racinaire (c) stockées dans l'ensemble du profil de sol (0-60 cm) pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en continu (C) et en rotation (R) en 2017. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

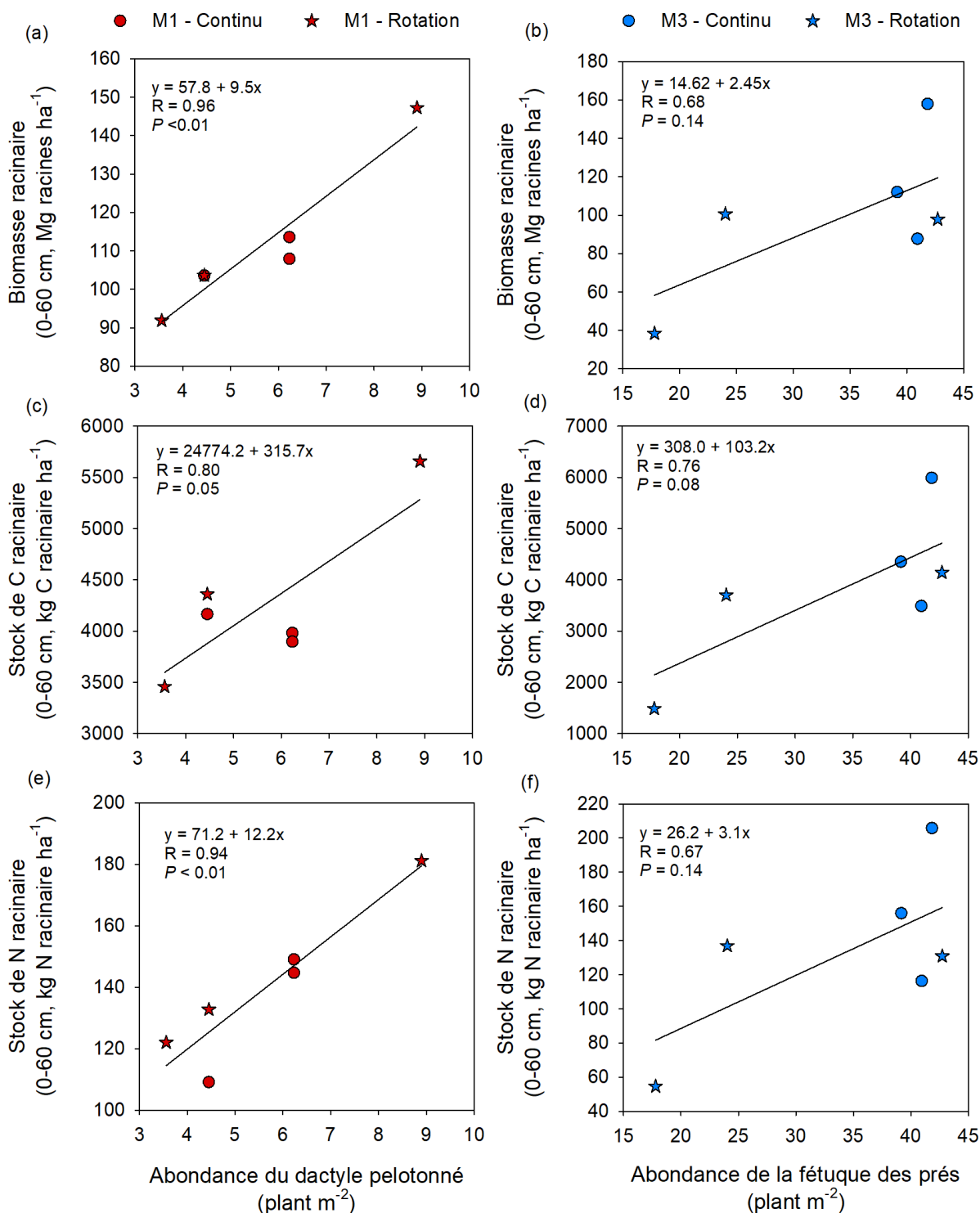


Figure 5: Influence de l'abondance du dactyle pelotonné dans le mélange 1 (M1) et de la fétuque des prés dans le mélange 3 (M3) sur les quantités de biomasse racinaire (a, b) et de carbone (c, d) et d'azote (e, f) stockées dans l'ensemble du profil (0-60 cm) des sols sous une paissance en continu et en rotation en 2017.

Tableau 6: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2018.

		Concentration en carbone (C)	Concentration en azote (N)	Ratio C/N	Concentration en fibres			Distribution des racines	Stock de racines	Stock de C racinaire	Stock de N racinaire	
		(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	-	Soluble (mg g ⁻¹)	Hémicellulose (mg g ⁻¹)	Cellulose (mg g ⁻¹)	Lignine (mg g ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
0-20 cm												
Continu	M1	384 (14)	14.9 (0.9)	25.9 (0.6)	463 (13)	165 (5)	144 (10)	229 (9)	93 (3)	3358 (479)	1284 (167)	50 (7)
	M3	390 (11)	15.5 (1.2)	25.5 (2.3)	452 (11)	157 (11)	162 (14)	228 (6)	87 (9)	3471 (1136)	1357 (445)	51 (15)
	M4	346 (26)	11.7 (1.9)	30.7 (3.9)	451 (57)	176 (18)	140 (17)	233 (24)	82 (6)	2751 (552)	970 (245)	34 (13)
Rotation	M1	361 (14)	14.8 (1.3)	25.0 (3.2)	504 (49)	151 (23)	121 (5)	225 (26)	74 (17)	2809 (388)	1019 (157)	41 (7)
	M3	386 (26)	15.1 (1.3)	26.1 (3.3)	480 (98)	162 (66)	120 (12)	208 (26)	90 (4)	3344 (813)	1249 (220)	50 (13)
	M4	393 (16)	14.1 (1.5)	28.3 (1.7)	490 (10)	238 (nd)	116 (nd)	167 (nd)	95 (3)	4707 (1653)	1829 (617)	64 (21)
	<i>P_P</i>	0.90	0.52	0.54	0.55	0.30	0.05	0.34	0.47	0.91	0.90	0.73
	<i>P_M</i>	0.37	0.28	0.28	0.45	0.32	0.94	0.78	0.93	0.96	0.96	0.88
	<i>P_{PxM}</i>	0.38	0.54	0.77	0.99	0.48	0.40	0.98	0.04	0.72	0.40	0.59
20-40 cm												
Continu	M1	421 (13)	13.4 (0.6)	31.5 (1.5)	586 (nd)	53 (nd)	134 (nd)	245 (nd)	6 (3)	201 (82)	86 (37)	2.8 (1.2)
	M3	340 (51)	9.7 (0.7)	34.6 (3.2)	341 (nd)	90 (nd)	239 (nd)	330 (nd)	8 (6)	162 (95)	45 (22)	1.5 (0.8)
	M4	408 (12)	11.2 (0.7)	36.5 (1.6)	419 (nd)	92 (nd)	179 (nd)	310 (nd)	16 (6)	486 (147)	197 (60)	5.3 (1.4)
Rotation	M1	380 (21)	10.8 (2.1)	37.8 (7.2)	454 (23)	106 (13)	167 (22)	273 (23)	24 (17)	1660 (1427)	617 (534)	23.9 (21.8)
	M3	426 (22)	13.0 (2.3)	34.2 (4.4)	353 (nd)	291 (nd)	208 (nd)	149 (nd)	7 (2)	266 (92)	114 (38)	3.3 (0.9)
	M4	427 (10)	13.6 (0.4)	31.6 (1.3)	367 (nd)	288 (nd)	171 (nd)	174 (nd)	2 (1)	57 (40)	25 (18)	0.8 (0.6)
	<i>P_P</i>	0.65	0.48	0.71	nd	nd	nd	nd	0.67	0.30	0.26	0.32
	<i>P_M</i>	0.20	0.47	0.99	nd	nd	nd	nd	0.48	0.61	0.56	0.45
	<i>P_{PxM}</i>	0.06	0.10	0.30	nd	nd	nd	nd	0.07	0.04	0.01	0.08
40-60 cm												
Continu	M1	395 (71)	16.0 (2.5)	26.4 (7.1)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	1 (0)	31 (12)	14 (6)	0.5 (0.2)
	M3	423 (4)	13.6 (0.3)	31.2 (0.6)	476 (nd)	56 (nd)	178 (nd)	289 (nd)	5 (3)	141 (23)	60 (10)	1.9 (0.3)
	M4	349 (62)	10.1 (2.1)	35.3 (4.6)	677 (nd)	0 (nd)	120 (nd)	206 (nd)	2 (1)	62 (22)	24 (10)	0.7 (0.3)
Rotation	M1	354 (44)	8.5 (0.8)	43.2 (8.2)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	2 (1)	58 (41)	23 (17)	0.5 (0.3)
	M3	349 (25)	11.3 (1.4)	31.4 (2.3)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	3 (1)	107 (54)	36 (17)	1.2 (0.6)
	M4	457 (14)	14.3 (2.1)	33.0 (3.9)	374 (nd)	270 (nd)	201 (nd)	155 (nd)	3 (2)	130 (57)	61 (27)	2.0 (0.9)
	<i>P_P</i>	0.43	0.45	0.72	nd	nd	nd	nd	0.89	0.66	0.45	0.88
	<i>P_M</i>	0.58	0.93	0.85	nd	nd	nd	nd	0.13	0.06	0.10	0.13
	<i>P_{PxM}</i>	0.02	0.02	0.45	nd	nd	nd	nd	0.64	0.37	0.16	0.18

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la paissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

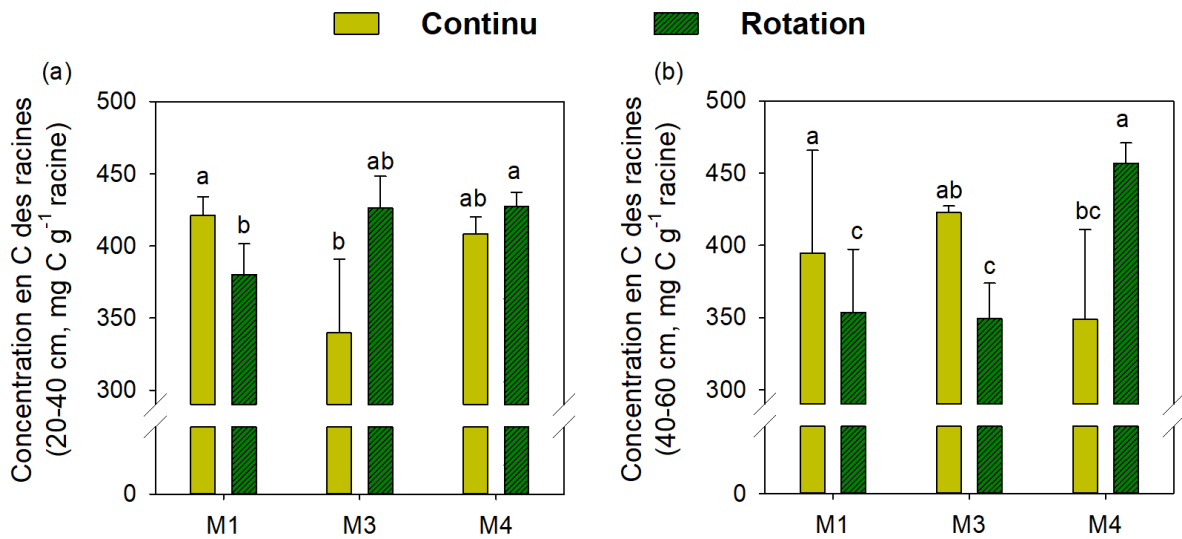


Figure 6: Concentration en carbone des racines des mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en rotation et en continu en 2018 à 20-40 cm (a) et 40-60 cm (b) de profondeur dans le sol. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

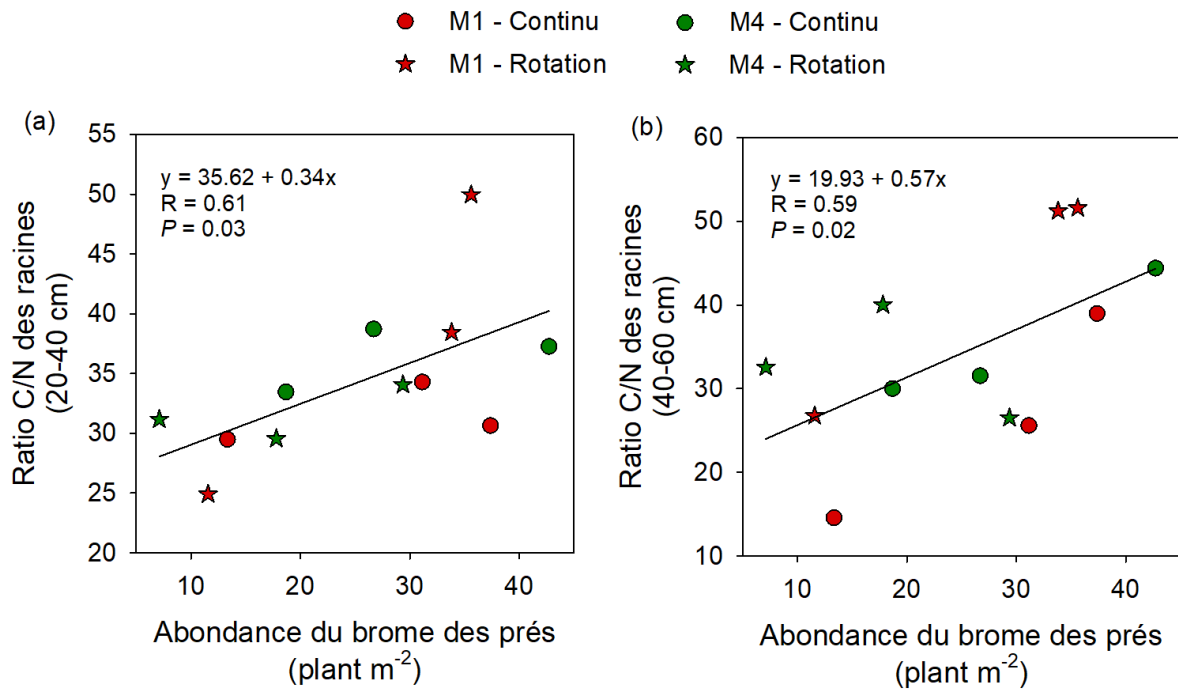


Figure 7: Impact de l'abondance du brome des prés sur le ratio carbone/azote (C/N) des racines des mélanges M1 et M4 sous une paissance en continu et en rotation entre 20-40 cm (a) et 40-60 cm (b) de profondeur dans le sol en 2018.

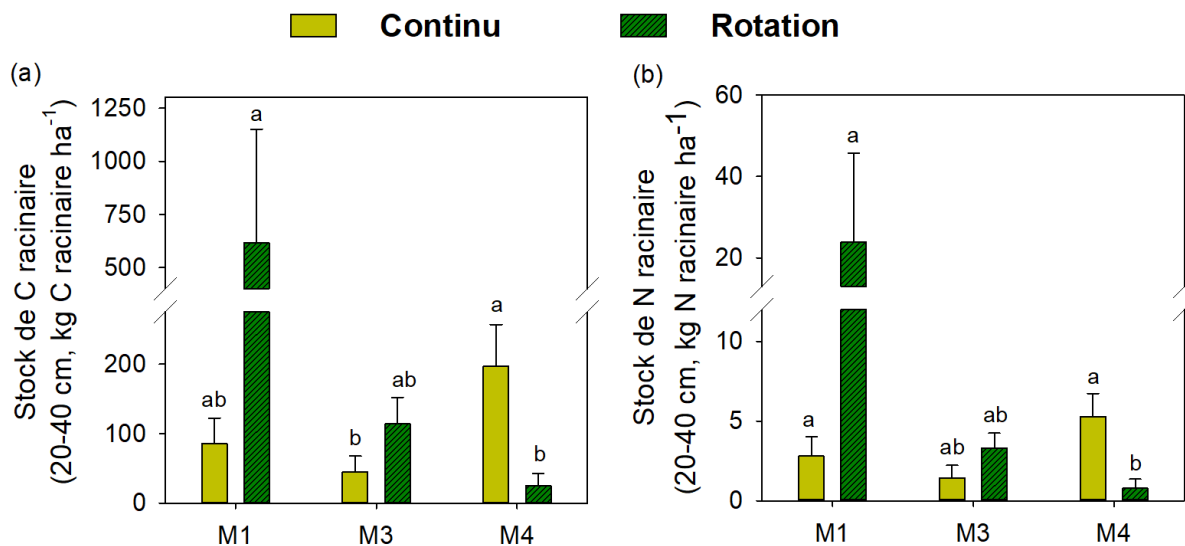


Figure 8: Stock de carbone racinaire (a) et d'azote racinaire (b) retrouvés entre 20-40 cm de profondeur dans le sol en 2018 pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en rotation et en continu. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

Tableau 7: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur la composition chimique des racines et la biomasse racinaire en 2019.

		Concentration en carbone (C)	Concentration en azote (N)	Ratio C/N	Concentration en fibres			Distribution des racines	Stock de racines	Stock de C racinaire	Stock de N racinaire	
		(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	-	Soluble (mg g ⁻¹)	Hémicellulose (mg g ⁻¹)	Cellulose (mg g ⁻¹)	Lignine (mg g ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
0-20 cm												
Continu	M1	405 (6)	14.6 (0.9)	28.0 (2.2)	410 (48)	227 (25)	173 (21)	187 (12)	74 (13)	3324 (1686)	1337 (683)	51 (26)
	M3	409 (9)	16.1 (0.7)	25.4 (0.6)	474 (32)	203 (22)	169 (6)	155 (15)	84 (3)	4353 (430)	1782 (187)	70 (8)
	M4	369 (40)	13.7 (1.2)	27.0 (1.8)	482 (44)	223 (23)	145 (9)	150 (27)	84 (7)	9011 (3228)	3226 (1518)	131 (58)
Rotation	M1	415 (12)	14.8 (0.4)	28.1 (0.8)	482 (44)	219 (18)	156 (2)	167 (6)	89 (3)	6627 (987)	2772 (482)	99 (17)
	M3	322 (35)	12.1 (1.1)	26.6 (1.9)	543 (82)	203 (36)	142 (nd)	199 (nd)	82 (8)	5947 (1084)	1963 (533)	72 (16)
	M4	329 (67)	12.3 (2.2)	26.6 (1.4)	529 (91)	192 (36)	140 (24)	138 (31)	79 (8)	5060 (465)	1700 (412)	74 (15)
	<i>P_P</i>	0.21	0.07	0.51	0.54	0.73	0.10	0.88	0.14	0.20	0.53	0.90
	<i>P_M</i>	0.24	0.45	0.16	0.49	0.59	0.52	0.14	0.35	0.77	0.66	0.82
	<i>P_{PxM}</i>	0.24	0.13	0.79	0.65	0.88	0.21	0.14	0.32	0.06	0.16	0.19
20-40 cm												
Continu	M1	363 (36)	13.3 (2.3)	28.0 (2.3)	506 (nd)	188 (nd)	205 (nd)	100 (nd)	26 (22)	505 (308)	187 (113)	7.0 (4.2)
	M3	321 (50)	12.4 (2.0)	26.1 (1.8)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	9 (3)	499 (218)	182 (93)	7.0 (3.8)
	M4	405 (17)	13.0 (0.9)	31.3 (1.2)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	4 (3)	297 (168)	116 (62)	3.6 (1.2)
Rotation	M1	391 (8)	11.4 (1.0)	34.7 (2.7)	412 (nd)	292 (nd)	123 (nd)	172 (nd)	12 (6)	997 (629)	382 (235)	10.1 (5.6)
	M3	346 (39)	11.6 (1.5)	30.1 (1.1)	577 (nd)	191 (nd)	126 (nd)	105 (nd)	11 (4)	892 (418)	277 (100)	9.1 (3.2)
	M4	383 (29)	12.6 (0.8)	30.3 (1.1)	497 (nd)	204 (nd)	186 (nd)	113 (nd)	8 (4)	501 (239)	179 (71)	6.0 (2.5)
	<i>P_P</i>	0.89	0.54	0.07	nd	nd	nd	nd	0.04	0.02	0.05	0.06
	<i>P_M</i>	0.15	0.40	0.19	nd	nd	nd	nd	0.11	0.17	0.47	0.35
	<i>P_{PxM}</i>	0.52	0.75	0.35	nd	nd	nd	nd	0.93	0.84	0.96	0.94
40-60 cm												
Continu	M1	353 (10)	11.0 (0.6)	32.2 (2.7)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	8 (4)	198 (31)	70 (11)	2.2 (0.4)
	M3	393 (24)	11.8 (2.3)	37.2 (10.4)	338 (nd)	295 (nd)	148 (nd)	219 (nd)	8 (4)	424 (231)	176 (99)	4.1 (1.5)
	M4	402 (26)	9.9 (1.5)	42.0 (5.1)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	3 (1)	194 (62)	81 (30)	1.9 (0.6)
Rotation	M1	502 (102)	16.0 (3.8)	32.0 (1.0)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	3 (1)	211 (97)	98 (36)	3.1 (1.1)
	M3	377 (41)	11.6 (1.8)	32.4 (3.0)	447 (nd)	227 (nd)	198 (nd)	129 (nd)	5 (2)	380 (191)	125 (48)	3.8 (1.4)
	M4	343 (49)	11.8 (1.8)	29.2 (0.5)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	nd (nd)	7 (4)	433 (265)	124 (59)	4.2 (2.0)
	<i>P_P</i>	0.28	0.41	0.70	nd	nd	nd	nd	0.48	0.90	0.54	0.20
	<i>P_M</i>	0.92	0.74	0.95	nd	nd	nd	nd	0.32	0.56	0.43	0.19
	<i>P_{PxM}</i>	0.02	0.76	0.18	nd	nd	nd	nd	0.10	0.49	0.68	0.19

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la paissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

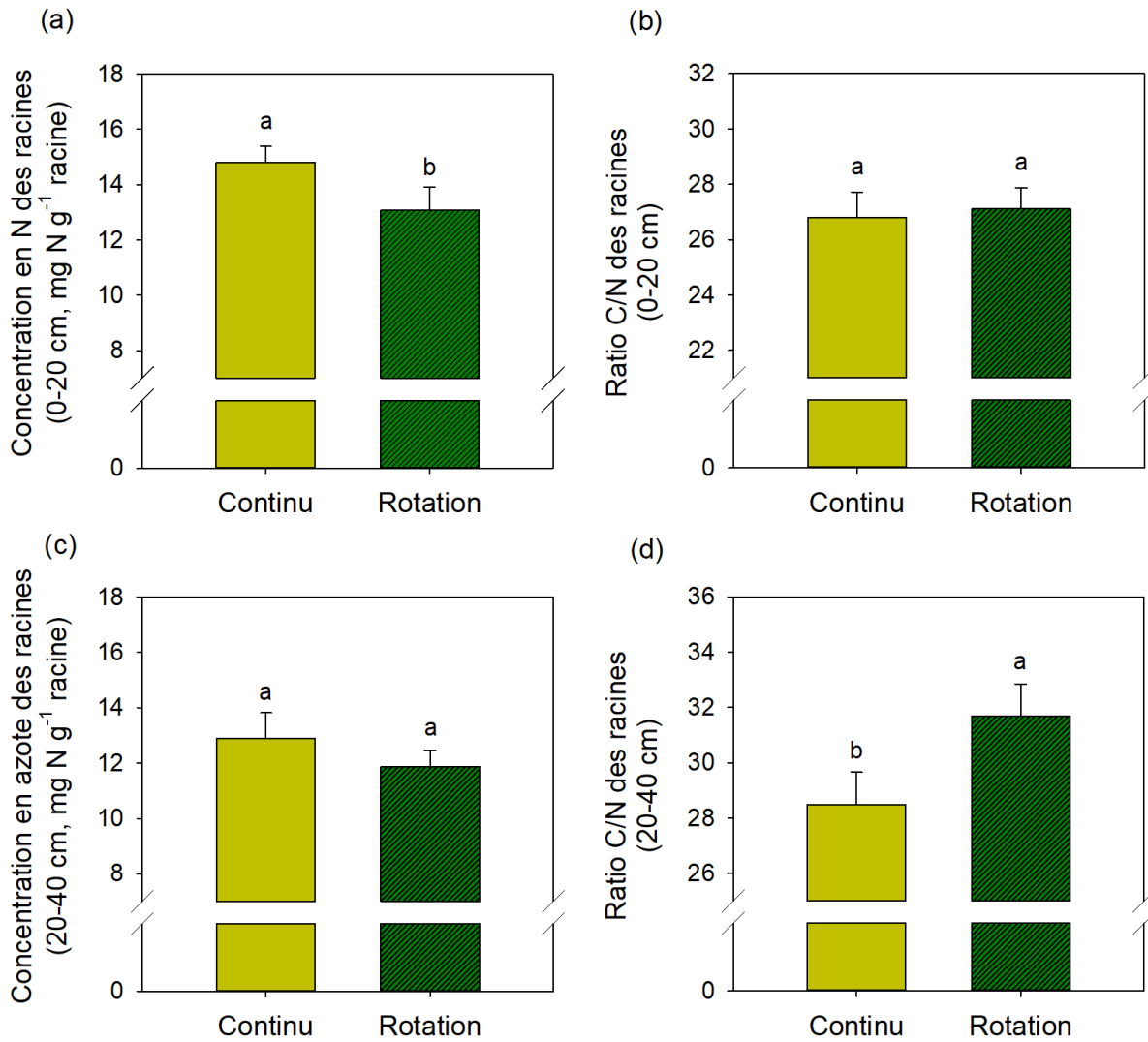


Figure 9: Influence de la paissance en continu et en rotation sur la concentration en azote (N) et le ratio carbone/azote (C/N) des racines retrouvées entre 0-20 cm (a, b) et 20-40 cm (c, d) en 2019. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

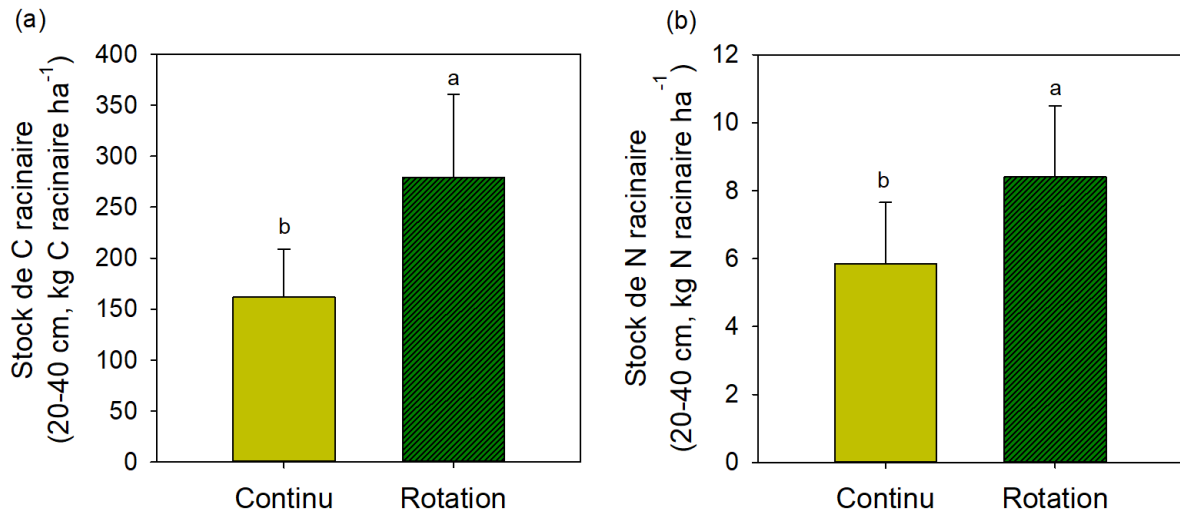


Figure 10: Quantités de carbone (C) racinaire (a) et d'azote (N) racinaire stockées à 20-40 cm de profondeur pour les traitements de paissance en continu et en rotation. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

Tableau 8: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2017.

		Concentration en carbone du sol			Indice $\Delta^{13}\text{C}$ (‰)	Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	Stocks de carbone du sol		
		Fraction légère (kg C _{FL} g ⁻¹ sol)	Fraction dense (kg C _{FD} g ⁻¹ sol)	Sol entier (kg C _{WH} g ⁻¹ sol)			Fraction légère (Mg C _{FL} ha ⁻¹)	Fraction dense (Mg C _{FD} ha ⁻¹)	Sol entier (Mg C _{WH} ha ⁻¹)
0-20 cm									
Continu	M1	2.4 (1.4)	19.4 (3.4)	21.8 (4.6)	0.02 (0.13)	1.21 (0.11)	5.2 (2.8)	45.7 (3.8)	50.9 (5.5)
	M3	0.4 (0.4)	19.7 (5.3)	20.1 (5.7)	-0.04 (0.14)	1.25 (0.12)	0.8 (0.8)	46.7 (7.2)	47.5 (8.0)
	M4	2.9 (1.3)	18.9 (3.7)	21.7 (5.0)	-0.02 (0.09)	1.36 (0.09)	7.3 (3.1)	50.4 (7.1)	57.7 (9.9)
Rotation	M1	4.5 (0.5)	17.0 (2.6)	21.1 (2.5)	0.08 (0.12)	1.26 (0.03)	10.4 (1.4)	42.6 (5.5)	52.9 (5.3)
	M3	3.3 (1.7)	20.1 (1.6)	23.4 (1.0)	0.22 (0.03)	1.22 (0.11)	8.5 (4.4)	48.5 (1.7)	57.0 (4.5)
	M4	2.1 (1.5)	18.2 (1.4)	20.2 (1.6)	0.00 (0.08)	1.32 (0.07)	5.5 (4.2)	47.6 (1.3)	53.1 (3.1)
	<i>P_P</i>	0.27	0.50	0.90	0.01	0.86	0.17	0.65	0.63
	<i>P_M</i>	0.35	0.68	0.55	0.02	0.09	0.61	0.43	0.79
	<i>P_{PxM}</i>	0.19	0.69	0.22	0.22	0.60	0.31	0.76	0.47
20-40 cm									
Continu	M1	0.9 (0.9)	4.9 (2.2)	5.8 (3.1)	-0.26 (0.11)	1.67 (0.12)	3.4 (3.3)	17.3 (8.9)	20.7 (12.2)
	M3	0.7 (0.5)	6.0 (3.6)	6.7 (4.1)	0.01 (0.13)	1.81 (0.06)	2.3 (1.7)	20.6 (11.9)	23.0 (13.6)
	M4	0.3 (0.2)	3.2 (1.2)	3.5 (1.3)	-0.07 (0.02)	1.78 (0.07)	1.1 (0.6)	11.7 (4.7)	12.8 (5.1)
Rotation	M1	1.6 (1.0)	3.9 (0.3)	5.5 (1.3)	0.02 (0.10)	1.87 (0.13)	5.8 (3.2)	14.3 (0.8)	20.0 (3.9)
	M3	0.3 (0.3)	5.8 (2.1)	6.0 (2.0)	-0.07 (0.10)	1.80 (0.07)	0.9 (0.9)	21.2 (8.3)	22.1 (8.1)
	M4	0.5 (0.3)	3.5 (0.9)	4.0 (1.0)	0.08 (0.09)	1.78 (0.03)	1.9 (1.0)	12.4 (3.6)	14.3 (3.8)
	<i>P_P</i>	0.70	0.56	0.57	0.10	0.34	0.46	0.87	1.00
	<i>P_M</i>	0.71	0.69	0.37	0.26	0.90	0.91	0.19	0.32
	<i>P_{PxM}</i>	0.32	0.91	0.95	0.07	0.34	0.82	0.90	0.97
40-60 cm									
Continu	M1	0.0 (0.0)	1.4 (0.1)	1.5 (0.1)	-0.39 (0.11)	1.93 (0.06)	0.0 (0.0)	5.6 (0.4)	5.6 (0.4)
	M3	0.0 (0.0)	1.4 (0.3)	1.4 (0.3)	-0.31 (0.06)	1.89 (0.06)	0.1 (0.1)	5.3 (1.5)	5.4 (1.5)
	M4	0.2 (0.1)	1.6 (0.3)	1.8 (0.4)	-0.45 (0.27)	1.90 (0.08)	0.6 (0.3)	6.2 (1.2)	6.8 (1.5)
Rotation	M1	0.7 (0.7)	1.3 (0.3)	2.0 (1.0)	0.18 (0.30)	1.78 (0.09)	2.6 (2.5)	4.7 (1.1)	7.3 (3.5)
	M3	0.1 (0.1)	1.3 (0.2)	1.4 (0.3)	-0.28 (0.12)	1.80 (0.08)	0.4 (0.2)	4.5 (0.6)	4.9 (0.8)
	M4	0.2 (0.1)	1.4 (0.2)	1.6 (0.2)	0.03 (0.16)	1.69 (0.09)	0.8 (0.4)	4.7 (0.5)	5.5 (0.6)
	<i>P_P</i>	0.20	0.17	0.73	0.03	0.03	0.20	0.03	0.57
	<i>P_M</i>	0.44	0.40	0.75	0.26	0.71	0.45	0.59	0.96
	<i>P_{PxM}</i>	0.87	0.80	0.75	0.18	0.77	0.87	0.87	0.91

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la paissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

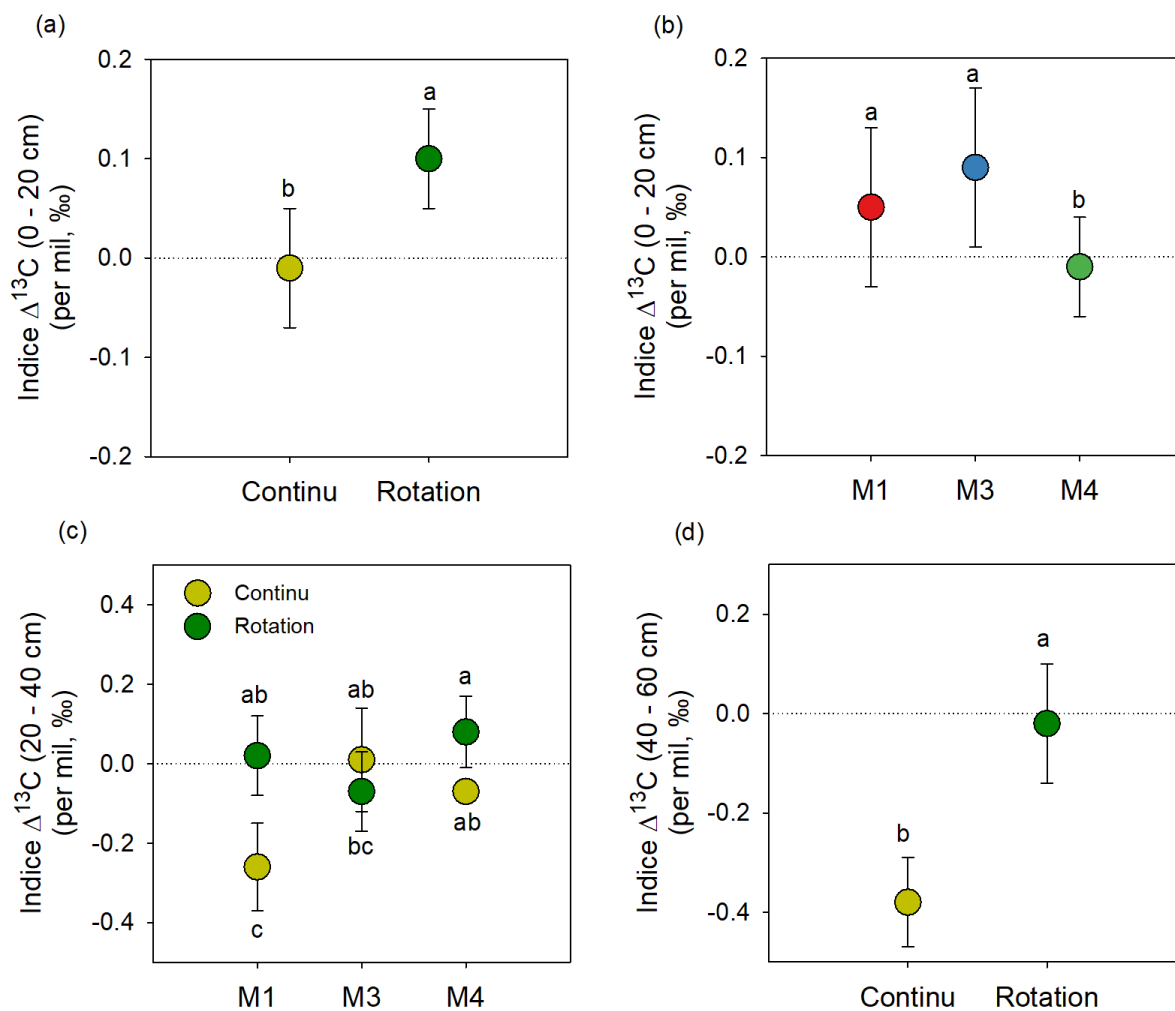


Figure 11: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur l'indice isotopique delta (Δ) ^{13}C du sol entre 0-20 cm (a, b), 20-40 cm (c) et 40-60 cm (d) de profondeur en 2017. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

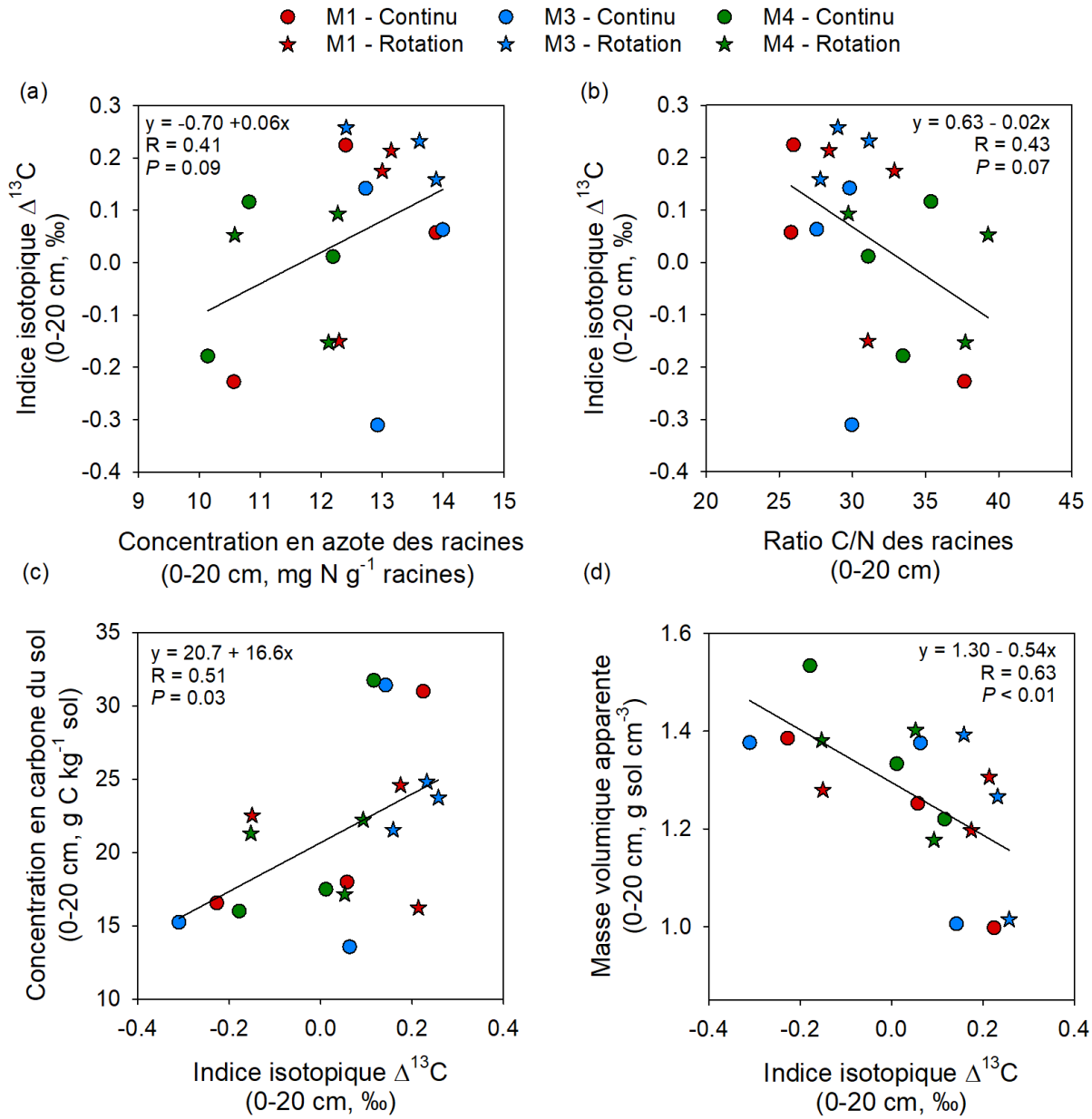


Figure 12: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et la concentration en azote (a) et le ratio C/N (b) des racines, ainsi qu'avec la concentration en carbone (c) et la masse volumique apparente (d) entre 0-20 cm pour les mélanges et les modes de paissance en 2017.

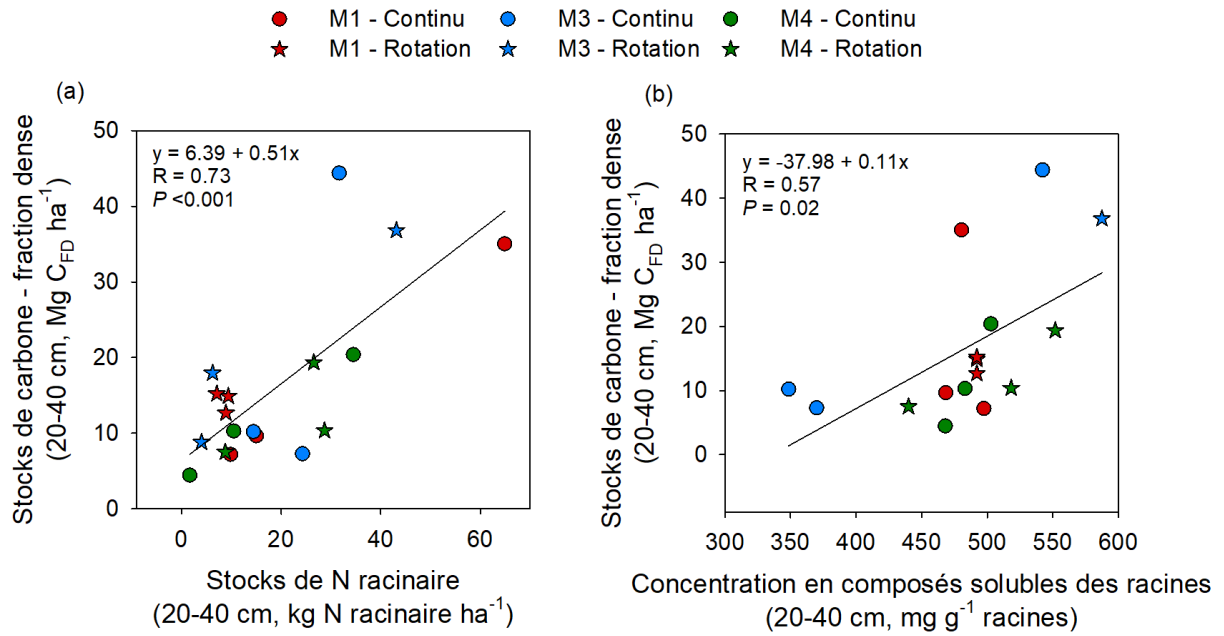


Figure 13: Influence des stocks d'azote racinaire (a) et de la concentration en composés solubles des racines (b) sur les stocks de carbone de la fraction dense en 20-40 cm de profondeur pour les deux modes de paissance et les trois mélanges étudiés en 2017.

Tableau 9: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2018.

		Concentration en carbone du sol			Indice $\Delta^{13}\text{C}$ (‰)	Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	Stocks de carbone du sol		
		Fraction légère (kg C _{FL} g ⁻¹ sol)	Fraction dense (kg C _{FD} g ⁻¹ sol)	Sol entier (kg C _{WH} g ⁻¹ sol)			Fraction légère (Mg C _{FL} ha ⁻¹)	Fraction dense (Mg C _{FD} ha ⁻¹)	Sol entier (Mg C _{WH} ha ⁻¹)
0-20 cm									
Continu	M1	7.0 (2.3)	13.2 (0.6)	20.1 (2.2)	-0.06 (0.14)	1.20 (0.10)	16.6 (5.0)	31.3 (1.2)	47.8 (4.9)
	M3	5.8 (0.4)	21.8 (3.9)	21.3 (7.5)	-0.52 (0.25)	1.18 (0.15)	13.5 (0.7)	46.1 (12.0)	51.0 (9.6)
	M4	15.3 (6.0)	8.7 (2.6)	24.0 (3.9)	0.50 (0.54)	1.03 (0.04)	30.9 (11.1)	18.3 (6.1)	49.2 (6.9)
Rotation	M1	4.8 (0.7)	18.0 (0.6)	22.8 (0.1)	0.74 (0.98)	1.06 (0.15)	10.1 (1.9)	38.4 (5.6)	48.6 (6.8)
	M3	4.9 (2.1)	13.5 (0.9)	18.4 (1.3)	0.11 (0.75)	1.05 (0.10)	9.8 (4.1)	28.3 (3.5)	38.1 (2.9)
	M4	4.7 (1.4)	16.3 (2.0)	21.0 (3.0)	0.51 (0.32)	1.10 (0.01)	10.3 (3.0)	35.7 (4.2)	46.0 (6.3)
	<i>P_P</i>	0.01	0.45	0.67	0.07	0.38	0.01	0.42	0.90
	<i>P_M</i>	0.55	0.09	0.31	0.08	0.75	0.49	0.09	0.44
	<i>P_{PxM}</i>	0.07	0.01	0.13	0.85	0.44	0.29	0.02	0.63
20-40 cm									
Continu	M1	10.9 (4.6)	2.1 (0.3)	12.9 (4.2)	-0.52 (0.05)	1.33 (0.10)	27.2 (10.0)	5.6 (1.3)	32.8 (8.8)
	M3	9.4 (4.1)	5.1 (1.4)	14.5 (2.7)	0.28 (0.27)	1.21 (0.05)	23.0 (10.6)	12.1 (3.5)	35.1 (7.4)
	M4	20.3 (2.0)	2.2 (0.5)	22.4 (1.8)	-0.03 (0.23)	1.32 (0.07)	53.4 (5.1)	5.8 (1.6)	59.2 (5.2)
Rotation	M1	13.2 (0.9)	2.9 (1.0)	16.1 (0.5)	-0.32 (0.27)	1.37 (0.06)	36.2 (3.6)	7.7 (2.3)	43.9 (1.2)
	M3	8.4 (3.3)	2.2 (0.2)	10.5 (3.1)	-0.28 (0.14)	1.50 (0.13)	23.3 (8.5)	6.6 (1.3)	29.9 (7.2)
	M4	13.7 (2.1)	3.7 (1.9)	17.4 (2.9)	-0.35 (0.12)	1.49 (0.07)	40.4 (5.1)	11.3 (6.2)	51.7 (9.5)
	<i>P_P</i>	0.90	0.34	0.41	0.33	0.03	0.27	0.78	0.93
	<i>P_M</i>	0.08	0.51	0.06	0.08	0.74	0.03	0.63	0.02
	<i>P_{PxM}</i>	0.48	0.15	0.32	0.23	0.34	0.22	0.22	0.39
40-60 cm									
Continu	M1	12.2 (3.1)	1.7 (0.7)	13.9 (3.0)	-0.21 (0.71)	1.42 (0.09)	34.0 (7.0)	5.0 (2.4)	39.1 (7.1)
	M3	11.5 (3.7)	2.7 (1.1)	14.2 (4.5)	0.88 (1.28)	1.51 (0.09)	33.7 (9.5)	7.9 (3.1)	41.6 (11.6)
	M4	13.0 (2.1)	0.9 (0.2)	13.9 (2.2)	1.62 (1.70)	1.53 (0.07)	39.2 (4.8)	2.7 (0.7)	41.9 (4.9)
Rotation	M1	11.2 (5.4)	1.5 (0.3)	12.7 (5.2)	0.44 (0.54)	1.45 (0.04)	33.3 (16.7)	4.3 (0.8)	37.6 (15.9)
	M3	16.0 (4.3)	1.0 (0.3)	17.0 (4.0)	1.44 (0.62)	1.53 (0.11)	50.2 (16.3)	3.1 (0.8)	53.4 (15.7)
	M4	8.1 (2.2)	1.2 (0.3)	9.3 (2.0)	0.47 (0.42)	1.47 (0.05)	23.7 (6.1)	3.5 (0.90)	27.2 (5.4)
	<i>P_P</i>	0.90	0.83	0.72	0.98	0.98	0.99	0.88	0.57
	<i>P_M</i>	0.54	0.02	0.56	0.53	0.60	0.54	0.19	0.96
	<i>P_{PxM}</i>	0.36	<0.01	0.56	0.60	0.83	0.29	0.07	0.91

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la puissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

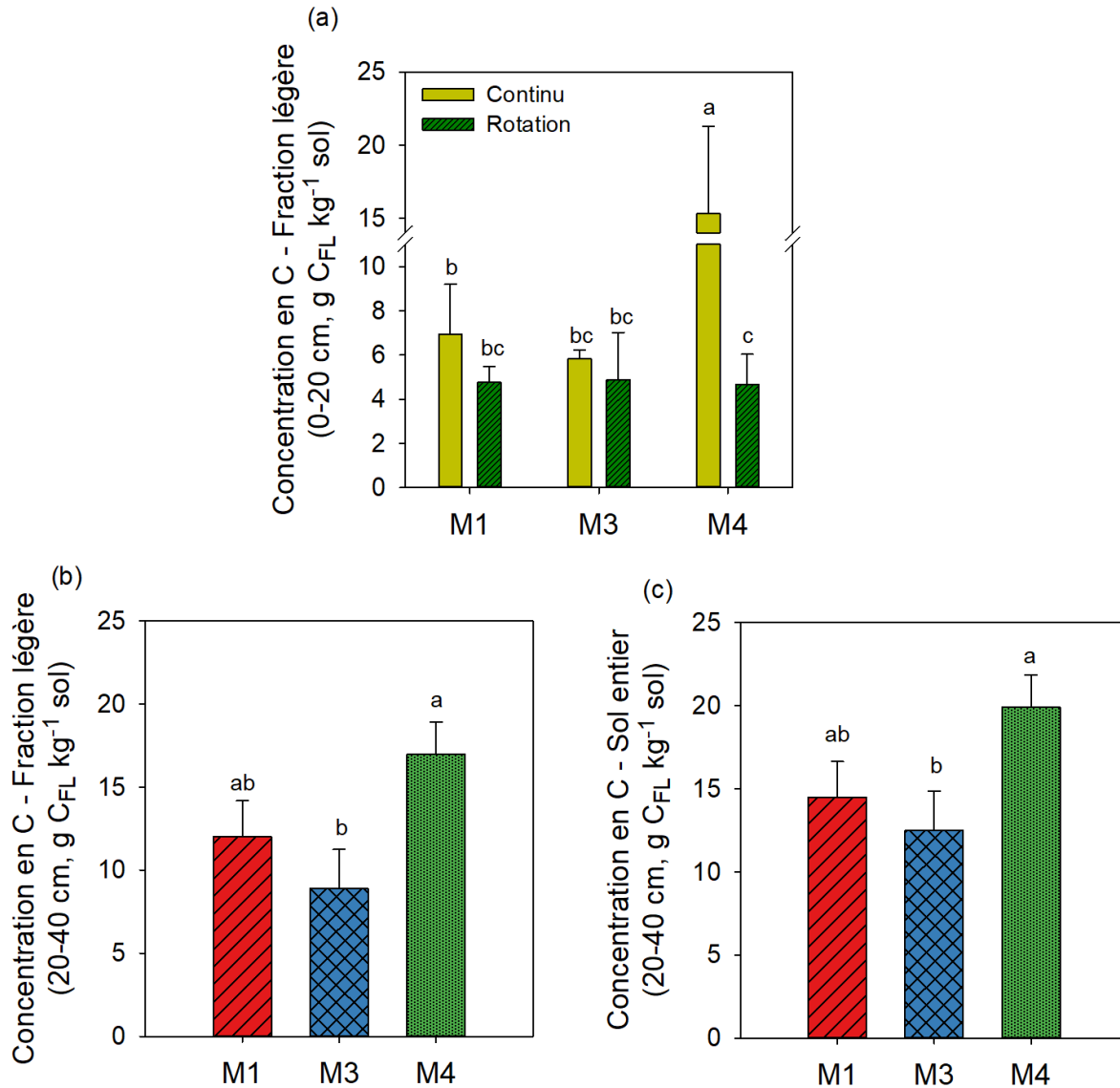


Figure 14: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur la concentration en carbone de la fraction légère entre 0-20 cm (a) et 20-40 cm (b) ainsi que du sol entier entre 20-40 cm (c) de profondeur en 2018. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

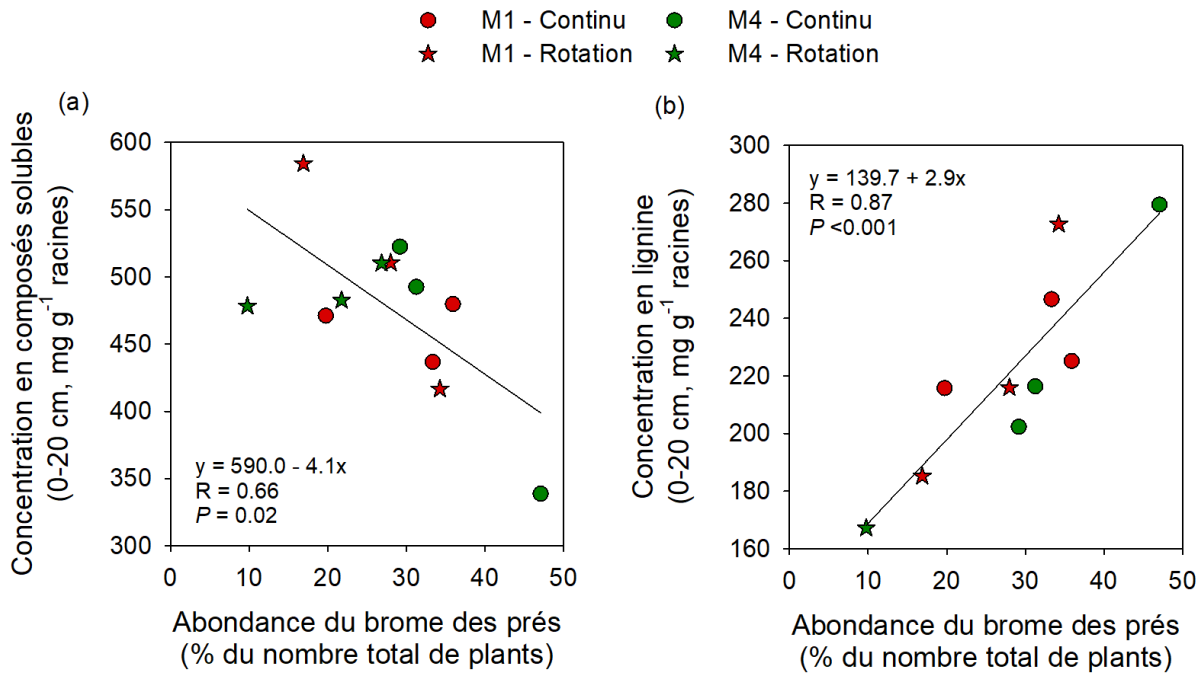


Figure 15: Impact de l'abondance du brome des prés sur la concentration en composés solubles (a) et en lignine (b) des racines des mélanges M1 et M4 sous une régie de paissance en continu et en rotation entre 0-20 cm de profondeur en 2018.

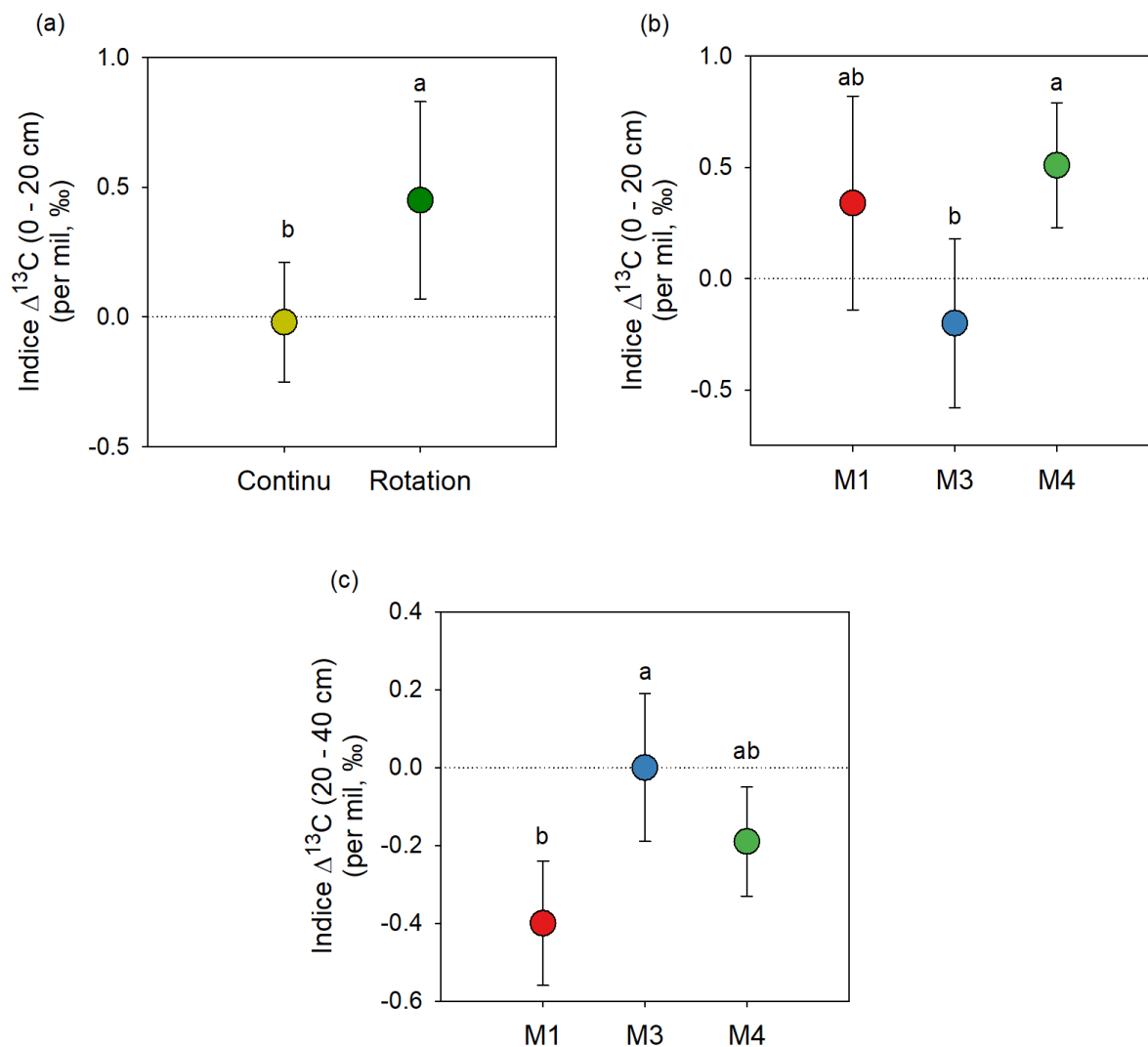


Figure 16: Influence du mode de paissance et des mélanges M1, M3 et M4 sur l'indice isotopique delta (Δ) ^{13}C du sol entre 0-20 cm (a, b) et 20-40 cm de profondeur (c) en 2018. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

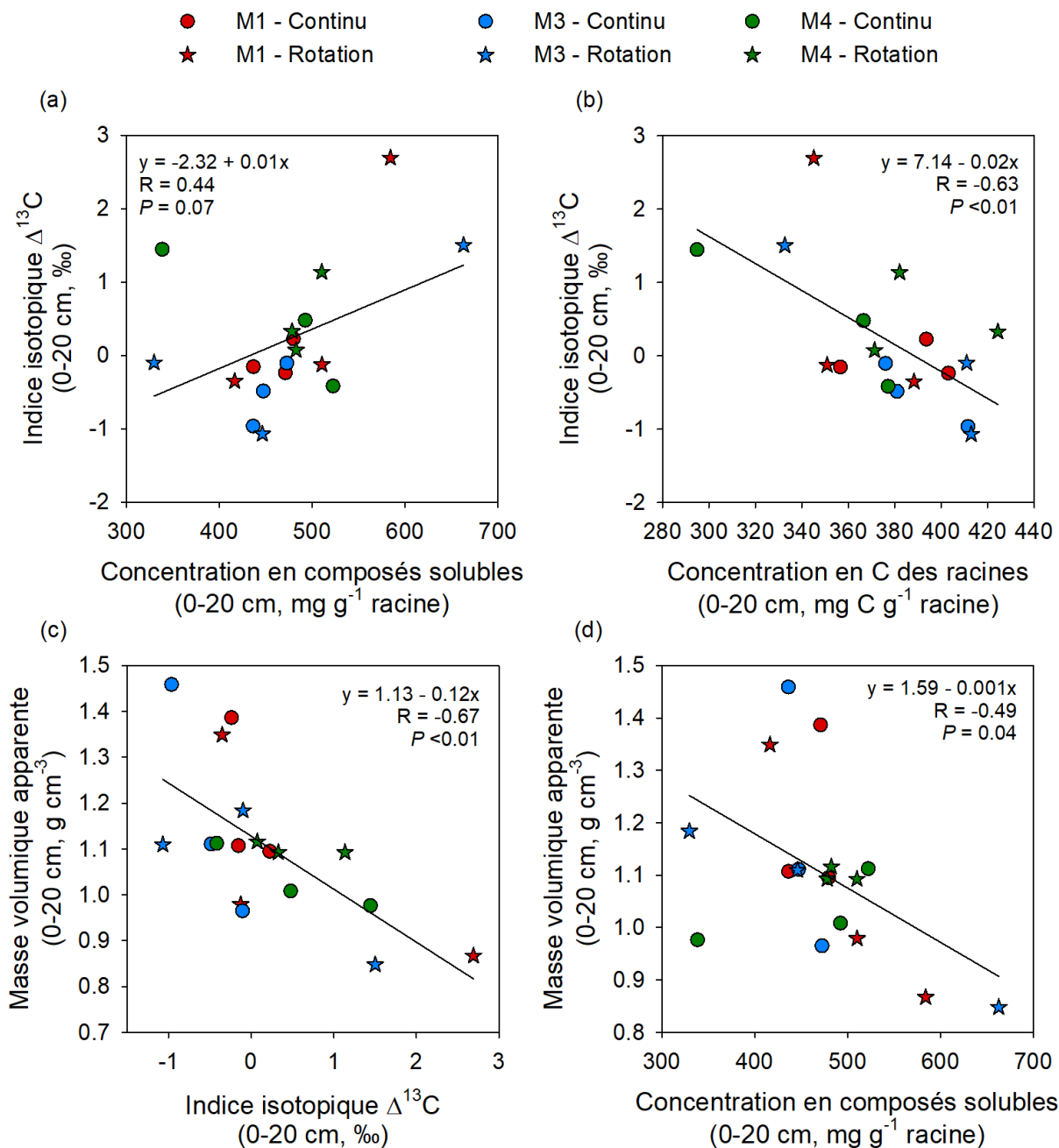


Figure 17: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et les concentrations en composés solubles (a) et en carbone (b) des racines et la masse volumique apparente du sol (c), ainsi qu'entre la masse volumique apparente et la concentration en composés solubles des racines entre 0-20 cm de profondeur pour mélanges M1, M3 et M4 sous une paissance en continu et en rotation en 2018.

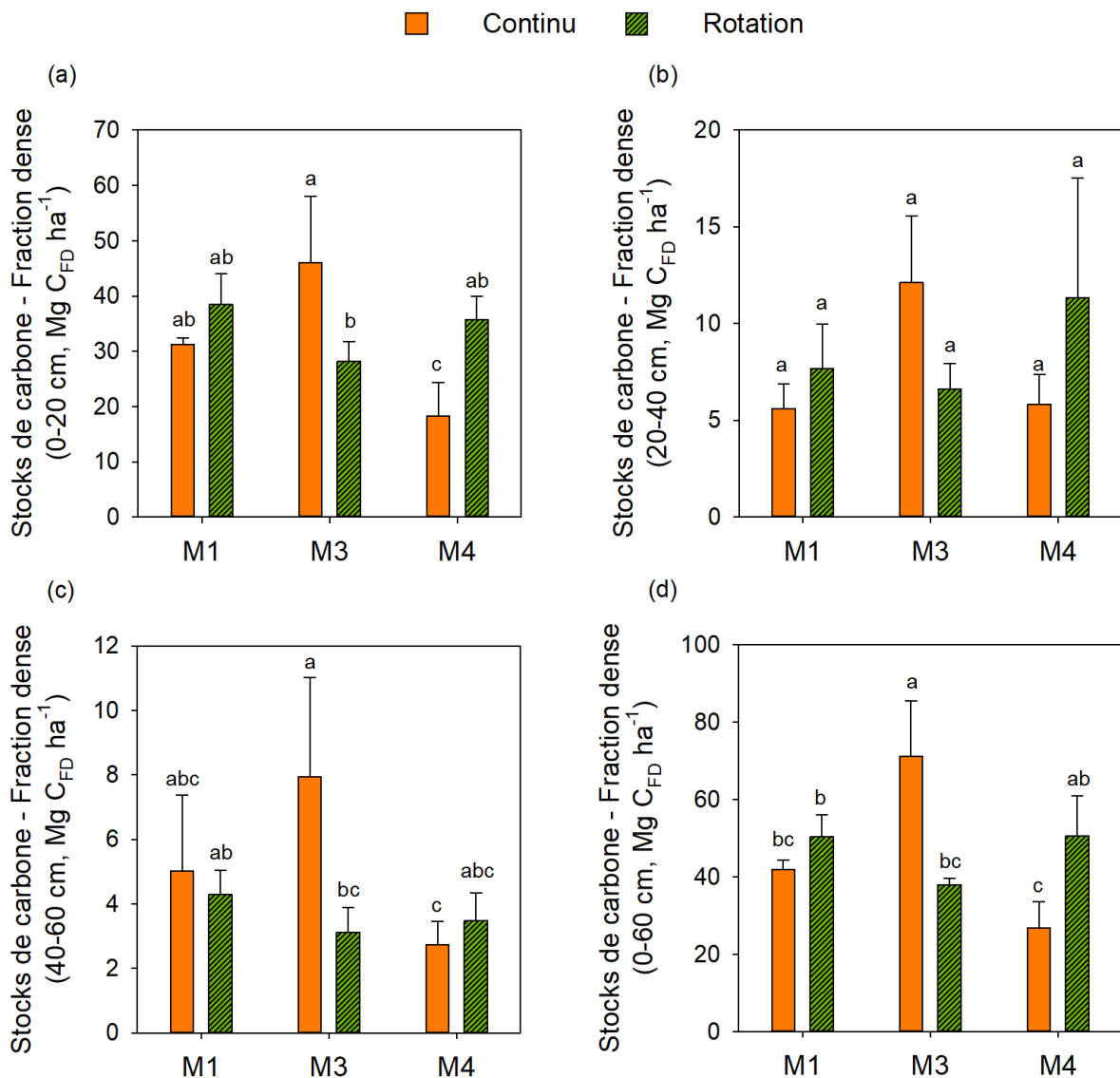


Figure 18: Quantité de carbone stocké dans la fraction dense (i.e., stable) du sol pour les mélanges M1, M3 et M4 soumis à la paissance en continu et en rotation entre 0-20 cm (a), 20-40 cm (b) et 40-60 cm (c) de profondeur ainsi que pour l'ensemble du profil de sol (i.e., 0-60 cm) (d) en 2018. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

Tableau 10: Moyennes (et écart-types) des effets des traitements sur les concentrations et les stocks de C du sol en 2019.

		Concentration en carbone du sol			Indice $\Delta^{13}\text{C}$ (‰)	Masse volumique apparente (g cm ⁻³)	Stocks de carbone du sol		
		Fraction légère (kg C _{FL} g ⁻¹ sol)	Fraction dense (kg C _{FD} g ⁻¹ sol)	Sol entier (kg C _{WH} g ⁻¹ sol)			Fraction légère (Mg C _{FL} ha ⁻¹)	Fraction dense (Mg C _{FD} ha ⁻¹)	Sol entier (Mg C _{WH} ha ⁻¹)
0-20 cm									
Continu	M1	2.7 (1.7)	16.7 (1.6)	19.4 (3.1)	0.28 (0.04)	0.84 (0.05)	4.4 (2.5)	27.9 (1.4)	32.3 (4.0)
	M3	2.2 (1.2)	16.4 (2.4)	18.6 (1.3)	-0.07 (0.32)	0.92 (0.06)	4.3 (2.3)	29.6 (3.0)	33.9(1.1)
	M4	1.6 (0.3)	14.8 (0.4)	16.5 (0.6)	0.68 (0.44)	0.88 (0.04)	2.9 (0.6)	26.2 (1.8)	29.1 (2.1)
Rotation	M1	5.7 (3.0)	14.7 (1.6)	20.3 (3.7)	0.15 (0.07)	0.85 (0.06)	9.0 (4.1)	25.1 (3.6)	34.1 (4.4)
	M3	5.7 (4.0)	15.2 (2.5)	20.8 (2.9)	0.17 (0.06)	0.89 (0.03)	9.9 (6.6)	25.1 (3.6)	36.9 (4.1)
	M4	0.9 (0.9)	16.2 (1.2)	17.1 (2.1)	0.73 (0.51)	0.95 (0.05)	1.6 (1.6)	30.8 (1.4)	32.4 (2.9)
	<i>P_P</i>	0.56	0.63	0.41	0.76	0.70	0.90	0.90	0.06
	<i>P_M</i>	0.35	0.99	0.21	0.21	0.20	0.37	0.66	0.53
	<i>P_{PxM}</i>	0.43	0.61	0.90	0.73	0.82	0.83	0.34	1.00
20-40 cm									
Continu	M1	2.1 (1.2)	2.0 (1.0)	4.1 (0.5)	0.70 (0.81)	0.96 (0.12)	3.4 (1.8)	4.3 (2.5)	7.7 (0.8)
	M3	0.5 (0.5)	3.1 (0.8)	3.6 (0.6)	0.39 (0.27)	1.00 (0.07)	0.9 (0.9)	6.1 (1.2)	7.0 (0.7)
	M4	0.4 (0.3)	2.4 (0.6)	2.8 (0.4)	0.10 (0.09)	1.00 (0.08)	0.84 (0.2)	4.9 (1.5)	5.7 (1.0)
Rotation	M1	6.5 (5.8)	3.7 (0.3)	10.2 (5.7)	0.04 (0.06)	1.00 (0.05)	12.0 (10.4)	7.3 (0.6)	19.4 (10.1)
	M3	6.6 (5.1)	3.0 (0.4)	9.6 (5.4)	0.32 (0.21)	1.00 (0.06)	11.9 (8.7)	5.9 (0.5)	17.9 (8.8)
	M4	0.2 (0.2)	4.8 (0.2)	4.9 (0.2)	-0.02 (0.04)	0.97 (0.11)	0.2 (0.2)	9.3 (1.2)	9.5 (1.1)
	<i>P_P</i>	0.19	0.06	<0.001	0.90	0.91	0.38	0.05	<0.01
	<i>P_M</i>	0.13	0.28	0.03	0.31	0.96	0.15	0.60	0.26
	<i>P_{PxM}</i>	0.27	0.15	0.44	0.74	0.84	0.21	0.25	0.62
40-60 cm									
Continu	M1	0.4 (0.1)	1.7 (0.2)	2.0 (0.2)	0.66 (0.55)	1.03 (0.14)	0.7 (0.1)	3.5 (0.7)	4.1 (0.6)
	M3	0.1 (0.1)	1.5 (0.4)	1.6 (0.3)	0.69 (0.50)	1.23 (0.09)	0.4 (0.4)	3.5 (0.8)	3.9 (0.5)
	M4	0.5 (0.2)	1.4 (0.3)	1.8 (0.1)	0.56 (0.17)	1.11 (0.08)	1.0 (0.5)	3.1 (0.8)	4.1 (0.4)
Rotation	M1	0.8 (0.4)	1.5 (0.1)	2.3 (0.5)	0.95 (0.28)	1.01 (0.07)	1.5 (0.7)	2.9 (0.2)	4.5 (0.6)
	M3	0.6 (0.6)	1.9 (0.5)	2.5 (0.1)	0.75 (0.78)	1.13 (0.14)	1.6 (1.6)	4.0 (0.9)	5.6 (0.8)
	M4	0.3 (0.1)	1.3 (0.3)	1.6 (0.2)	0.14 (0.22)	1.31 (0.16)	0.9 (0.4)	3.3 (0.8)	4.2 (0.4)
	<i>P_P</i>	0.40	0.86	0.05	0.94	0.57	0.46	0.55	0.28
	<i>P_M</i>	0.61	0.39	0.13	0.62	0.08	0.43	0.74	0.87
	<i>P_{PxM}</i>	0.60	0.60	0.01	0.59	<0.01	0.95	0.54	0.91

Note : Les valeurs de probabilité $Pr > F$ des effets de la puissance (P_P), des mélanges (P_M) et de leurs interactions (P_{PxM}) sont présentées en-dessous des moyennes des variables pour chaque horizon de sol. nd = données non disponible.

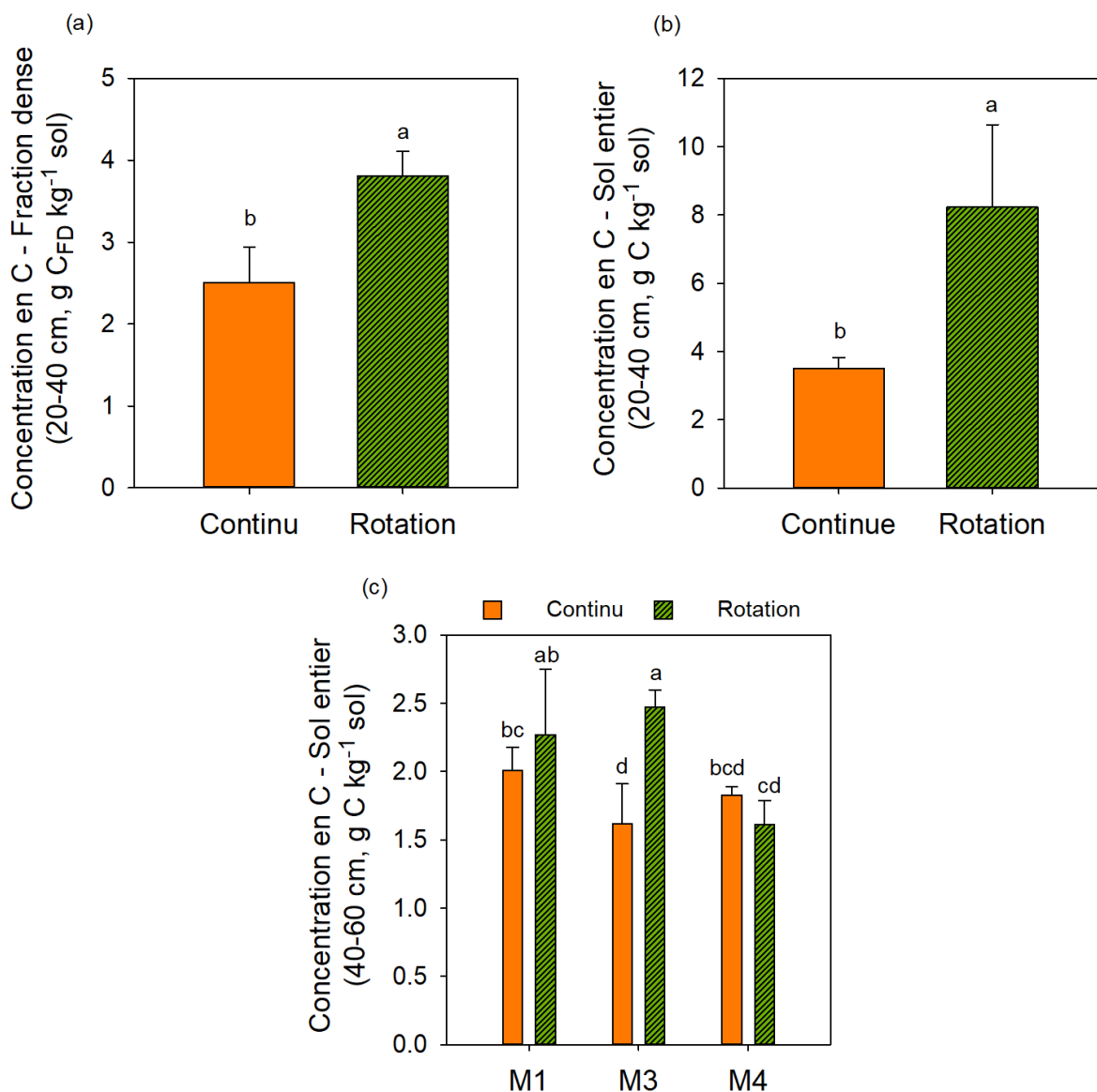


Figure 19: Concentration en carbone de la fraction dense (a) et du sol entier (b) en 2019 pour la paissance en continu et en rotation entre 20-40 cm de profondeur, et effet d'interaction entre la paissance et les mélanges sur la concentration en carbone du sol entier entre 40-60 cm de profondeur (c). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

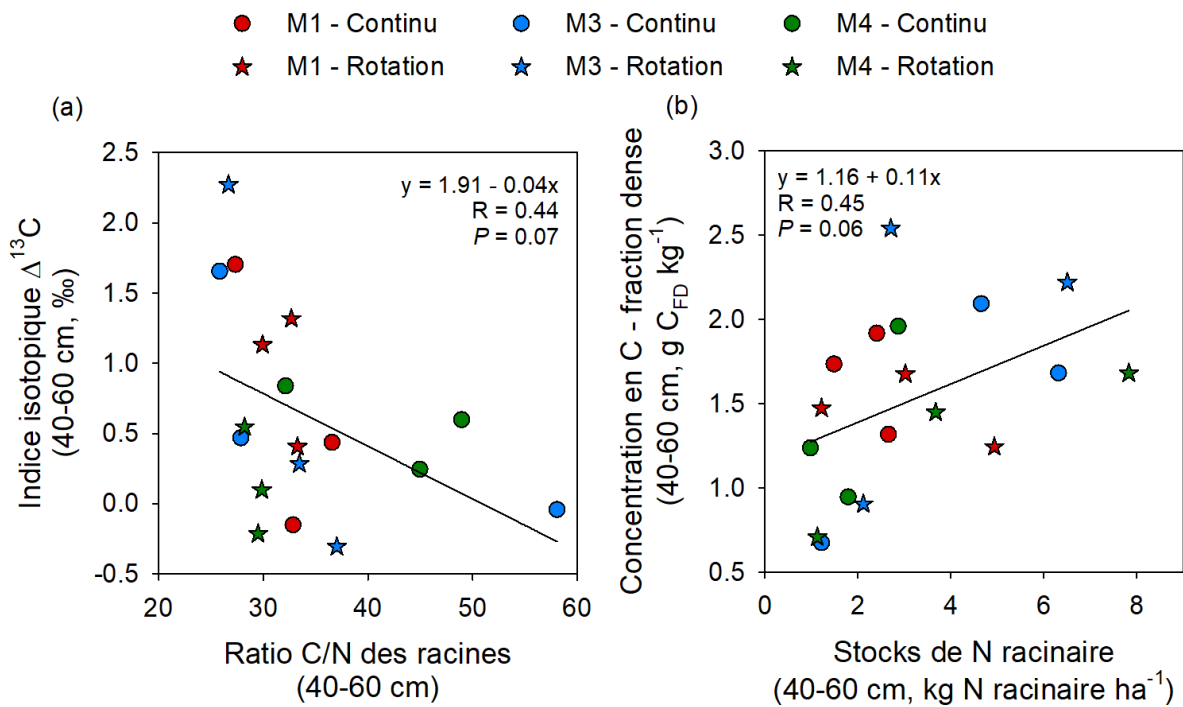


Figure 20: Relations entre l'indice isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ et le ratio C/N des racines (a) ainsi qu'entre les stocks de N racinaires et la concentration en carbone de la fraction dense du sol (b) entre 40-60 cm de profondeur pour les mélanges M1, M3 et M4 sous une paissance en continu et en rotation en 2019.

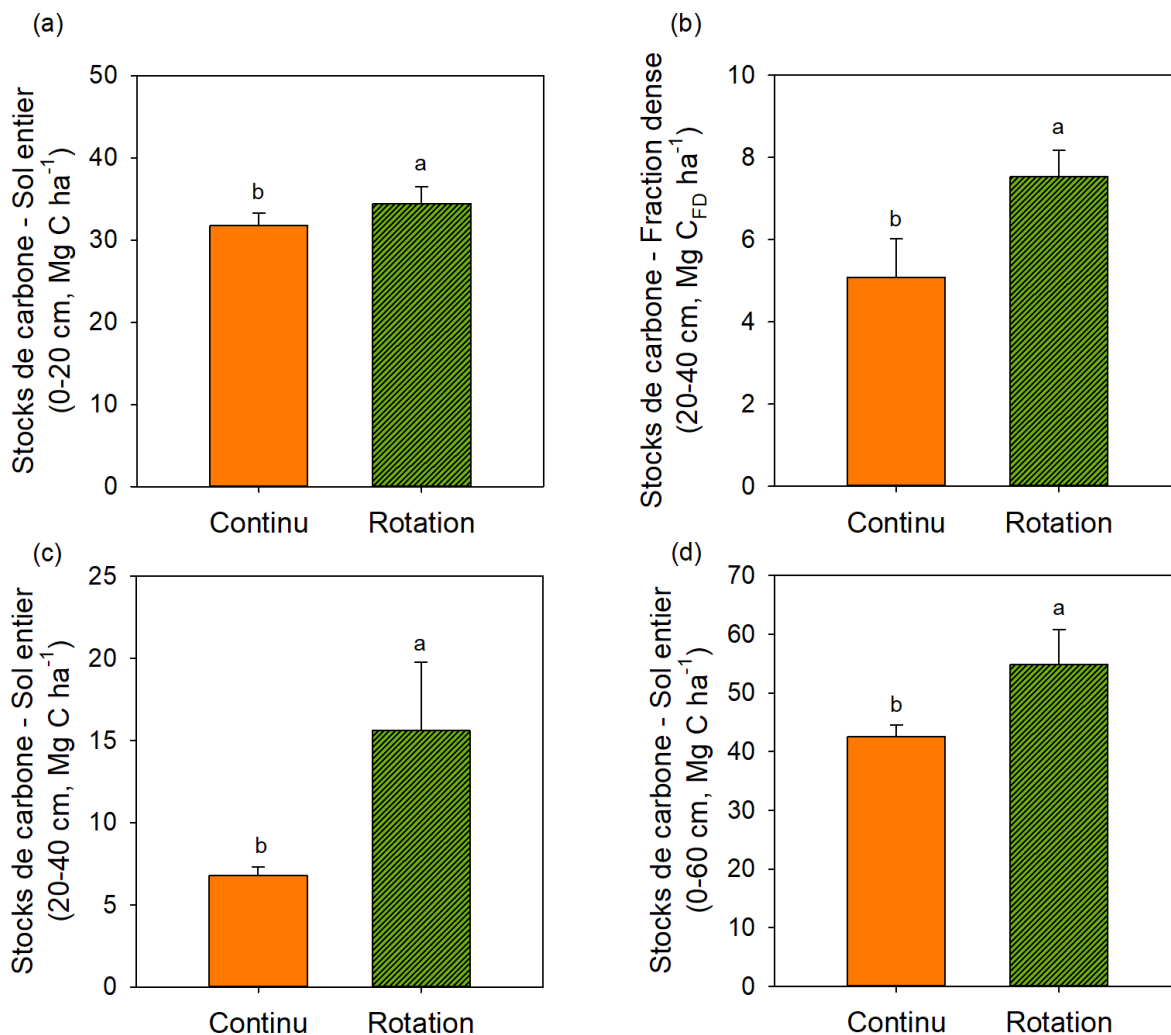


Figure 21: Quantités de carbone stocké dans la fraction dense et dans le sol entier sous une paissance en continu et en rotation en 2019 entre 0-20 cm (a) et 20-40 cm (b, c) de profondeur ainsi que dans l'ensemble du profil de sol (i.e., 0-60 cm) (d). Les barres d'erreur représentent l'erreur-type associée à la moyenne. Des lettres distinctes indiquent que les valeurs moyennes diffèrent significativement les unes des autres selon le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fischer.

Tableau 11: Résumé du coût d'implantation des différents mélanges fourragers complexes pour un hectare.

Coûts variables	Mélange M1	Mélange M2	Mélange M3	Mélange M4	Mélange M5
Approvisionnements ha ⁻¹ (\$)	766	687	690	717	702
Opérations culturales ha ⁻¹ (\$)	118	118	118	118	118
Autres coûts ha ⁻¹ (\$)	50	48	48	49	49
Coûts variables totaux ha ⁻¹ (\$)	935	853	856	885	868

Tableau 12: Résumé des coûts variables pour les types de paissance (rotation et continu) et des coûts par tonne de matière sèche (TMS) par hectare des pâturages pour les années 2017, 2018 et 2019.

Coûts variables	2017		2018		2019	
	Rotation	Continu	Rotation	Continu	Rotation	Continu
Approvisionnements ha ⁻¹ (\$)	92	92	281	281	281	281
Opérations culturales ha ⁻¹ (\$)	15	28	15	28	15	28
Autres coûts ha ⁻¹ (\$)	37	29	66	121	51	108
Coûts variables totaux ha ⁻¹ (\$)	145	149	362	433	347	418
Coûts TMS pâturage ha ⁻¹ (\$)	36	40	163	287	128	246