

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Comparaison de l'impact de deux méthodes de rénovation d'une prairie du domaine expérimental INRAE du Pin-au-Haras sur la productivité et l'évolution des stocks de Carbone du sol : le resemis et le sursemis

C. Kohler¹, A. Morvan-Bertrand¹, S. Lemauiel-Lavenant¹, Y. Gallard², J.B. Cliquet¹

Les prairies sont capables de stocker du carbone (C) dans leurs sols et ainsi d'atténuer les émissions anthropiques de CO₂. Leur renouvellement par labour, à des fins d'amélioration de la production, libère du C. Des méthodes de renouvellement alternatives existent, quel est leur impact sur le stock de C dans le sol ?

RESUME

L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet à court terme de deux techniques de rénovation des prairies sur la productivité et le stock de C du sol superficiel. Une prairie semée 12 ans auparavant située sur le Domaine Expérimental INRAE du Pin-au-Haras (Normandie) a été divisée en trois sous-parcelles : (i) non rénové, (ii) rénové par resemis et (iii) rénové par sursemis. Le rendement, les stocks de C de l'horizon 0-10 cm du sol et les propriétés de la matière organique du sol ont été comparés 8 et 20 mois plus tard. Les rénovations par resemis ou sursemis ont augmenté la production annuelle de 50 %. Dans les deux sous-parcelles rénovées, le stock de C organique de l'horizon 0-10 cm a été maintenu et la quantité de matière organique a augmenté. Le ratio C/N ainsi que la proportion de C soluble dans le sol n'ont pas été modifiés. Dans cet essai, la rénovation par sursemis a abouti à un gain de productivité comparable à celui du resemis sans nécessiter d'application de glyphosate permettant de maintenir le stock de C dans le sol.

SUMMARY

Effects of two grassland restoration methods on biomass yield and soil carbon storage: lessons from the INRAE Pin-au-Haras experimental farm.

The aim of this study was to evaluate the short-term effects of two grassland restoration methods on biomass yield and carbon storage in the upper soil layer. We used a grassland located on the INRAE Pin-au-Haras experimental farm (Normandy), which had been seeded 12 years ago. It was divided up into three subplots: (i) a control subplot; (ii) a subplot restored via reseeded; and (iii) a subplot restored via overseeding. Biomass yield, carbon levels in the top 10 cm of the soil, and the properties of the soil organic matter were examined 8 months and 20 months after the treatments were applied. The reseeded and overseeding methods increased annual biomass yield by 50%; the levels of organic carbon in the soil were maintained, and the amount of soil organic matter increased. Neither restoration method changed the C/N ratio or the proportion of soluble carbon in the soil. Our findings indicate that the overseeding method and the reseeded method similarly increased grassland productivity. However, the former does not require the use of glyphosate, allowing levels of carbon storage in the soil to remain stable.

En France, 21 % des émissions de gaz à effet de serre sont attribuées à l'agriculture (ADEME, 2011). L'élevage y contribue notamment via les émissions liées aux animaux d'élevage (CH₄), l'utilisation de fertilisants azotés qui provoque des émissions de N₂O, et l'utilisation des carburants et combustibles dont la combustion émet du CO₂. En

revanche, l'élevage, à travers notamment le maintien des prairies, est à l'origine de la fourniture de nombreux services écosystémiques (Dumont *et al.*, 2019 ; Tasset *et al.*, 2019). Les prairies occupent une place importante dans le paysage agricole et représentent en France près de 45 % de la surface agricole utile (Puydarrieux & Devaux, 2013). Elles fournissent du fourrage pour le

AUTEURS

1 : Normandie Univ, UNICAEN, INRAE, EVA, FED Normandie Végétale 4277, 14000 Caen ; jean-bernard.cliquet@unicaen.fr

2 : Domaine Expérimental INRAE Le Pin UE326, 61310 Le Pin-au-Haras, France

MOTS-CLES : prairie, sol, végétation, stockage du carbone, resemis, sursemis, travail du sol

KEY-WORDS : grassland, soil, vegetation, carbon storage, reseeded, overseeding, tillage

REFERENCES DE L'ARTICLE : C. Kohler, A. Morvan-Bertrand, S. Lemauiel-Lavenant, Y. Gallard, J.B. Cliquet (2020). « Comparaison de l'impact de deux méthodes de rénovation d'une prairie du domaine expérimental INRAE du Pin-au-Haras sur la productivité et l'évolution des stocks de Carbone du sol : le resemis et le sursemis ». *Fourrages*, 243, 31-37

bétail, mais constituent aussi un support de biodiversité modulé par le mode de gestion, l'intensité d'exploitation (fréquence de fauche ou chargement) et la fertilisation (Gaujour *et al.*, 2012). Elles rendent d'autres services comme la séquestration de C dans leurs sols qui, elle aussi, est modulée par la fertilisation et l'intensité de la défoliation (Soussana & Lemaire, 2014). Ce service représente une stratégie de mitigation de l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère (Soussana *et al.*, 2004).

Le labour des terres cultivées et la conversion de prairies permanentes en prairies temporaires ou grandes cultures réduit les stocks de C dans les sols (Balesdent *et al.*, 2000 ; Soussana *et al.*, 2004 ; Liu *et al.*, 2006 ; Powlson *et al.*, 2011 ; Post *et al.*, 2012). En fragmentant les micro-agrégats du sol, le labour accélère la minéralisation de la matière organique (MO) par l'augmentation de l'activité microbienne (Balesdent *et al.*, 2000 ; DeGryze *et al.*, 2004). Les émissions de CO₂ qui en résultent correspondent alors à des sorties de C du système. La conversion d'une prairie permanente en prairie temporaire induit ainsi une réduction des stocks de C dans les horizons supérieurs du sol (Linsler *et al.*, 2013). Les processus de déstockage de C étant souvent plus rapides que les processus d'accumulation de C (Soussana *et al.*, 2004), il convient de protéger les stocks avant d'avoir à les restaurer.

Le vieillissement d'une prairie peut se traduire par une flore moins productive. Le renouvellement de la prairie est l'option souvent retenue pour rétablir une végétation productive et de bonne valeur alimentaire. Dans ce cas, la prairie est généralement labourée puis semée. Les innovations relatives au matériel agricole et à la sélection variétale offrent des techniques alternatives au renouvellement des prairies par labour. Pour éviter le labour, la rénovation peut se faire par resemis ou par sursemis (Pierre *et al.*, 2013 ; Kizekova *et al.*, 2017 ; Gaillard *et al.*, 2017). La rénovation d'une prairie par resemis implique l'application d'un herbicide non sélectif détruisant la communauté végétale existante, un travail du sol superficiel, puis un semis sur sol nu. Les herbicides non sélectifs utilisés sont à base de glyphosate. La rénovation de prairie par resemis est donc une technique dépendante de la prolongation de l'autorisation de ce composé en agriculture ou de la mise au point d'un nouvel herbicide. Si cette technique de rénovation évite le labour, et donc limite les sorties de C, elle est néanmoins néfaste pour l'environnement. Le sursemis, ne nécessite qu'une scarification du sol en surface puis un semis sur un sol déjà couvert. Cette technique, même si elle est parfois associée à l'utilisation d'herbicides sélectifs anti-dicotylédones, évite l'usage d'un herbicide non-sélectif systémique et ne nécessite pas de matériel spécifique. Elle permet une réduction de l'impact sur l'environnement et des coûts, mais sa réussite est incertaine (Huguenin-Elie *et al.*, 2007 ; Lemasson *et al.*, 2008).

L'amélioration de la production des prairies vieillissantes par resemis ou sursemis, limite le travail

du sol. L'impact de ces techniques sur le stock de C dans les sols prairiaux est cependant peu connu. L'objectif de cette étude est de préciser l'effet à court terme de ces techniques sur la productivité et les stocks de C dans les sols prairiaux. La production et les stocks de C d'une prairie rénovée par resemis ou sursemis ont été comparés à ceux de la prairie non rénovée sur une même parcelle du domaine expérimental du Pin au Haras. Les effets de la rénovation sur le fonctionnement du sol ont été évalués par la détermination de la teneur en C de la MO, du ratio C/N du sol et de la teneur en C soluble du sol.

1. Matériels et méthodes

1.1. Site et dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite sur le Domaine Expérimental INRAE du Pin-au-Haras en Normandie (48°73' N, 0°17' E). Au cours de la période d'expérimentation (de 2012 à 2014), les précipitations moyennes étaient de 967 mm et la température moyenne de 10,7 °C, des conditions plus humides et plus chaudes en moyenne que les trente dernières années (727 mm ; 10,0 °C). La parcelle d'expérimentation a été cultivée en maïs, convertie en prairie en 1991 puis renouvelée en 2000. La production annuelle de la parcelle en 2012 a été de 10 t MS/ha ce qui la place dans une productivité assez faible pour le domaine expérimental INRAE du Pin-au-Haras dont certaines prairies dépassaient, la même année, 20 t MS/ha. La communauté végétale, paucispécifique et presque dépourvue de fabacées, est dominée par *Lolium perenne* L. et *Poa trivialis* L. La parcelle est exploitée à la fois par fauche et pâturage. Le sol de la prairie est argilo-limoneux fin, et les propriétés du sol sont présentées sur le tableau 1.

Propriété du sol (couche 0-20 cm)

Limon (%)	50,5 (2,2)
Argile (%)	23,1 (0,7)
Sable (%)	3,7 (0,7)
Carbonate de calcium (%)	0,7 (0,1)
pH _{H₂O}	7,9 (0,1)
CEC (Cmol kg ⁻¹)	1,3 (0,5)

CEC, capacité d'échange cationique.

TABLEAU 1 : Propriétés physico-chimiques de l'horizon 0-20 cm du sol avant le début de l'expérimentation. Les valeurs sont des moyennes ± erreurs standards (n = 3).

TABLE 1 : Physico-chemical properties of the upper soil layer (0-20 cm) before the beginning of the experiment. The values are the means ± standard errors (n = 3)

En septembre 2012 cette parcelle a été divisée en trois sous-parcelles de 1,6 ha parallèlement à la pente (Figure 1) :

- une sous-parcelle témoin « **non rénové** » : sans travail du sol ni semis, avec un désherbage antidicotylédones à large spectre (désherbant Ariane, Dow AgroSciences, Indianapolis, USA ; Clopyralid 23,3 g/L + Fluroxypyr 60 g/L + 2,4-MCPA 266,7 g/L) le 25 septembre.
- une sous-parcelle « **resemis** » : La sous-parcelle a été traitée avec 3L de désherbant systémique non sélectif (Glyphosate) le 25 septembre et un travail superficiel du sol a été réalisé avec une déchaumeuse (cover-crop) qui permet un travail du sol jusqu'à 15 cm de profondeur. Le semis a alors été réalisé le 3 octobre avec un semoir permettant un semis en lignes écartées de 14 cm combiné à une herse rotative avec un mélange *Lolium perenne* L. variété Fellin (23 kg/ha) et *Trifolium repens* L. variété Alice (2 kg/ha).
- une sous-parcelle « **sursemis** » : la sous-parcelle a été traitée avec 3L de désherbant sélectif antidicotylédones (Ariane, Dow AgroSciences, Indianapolis, USA ; Clopyralid 23,3 g/L + Fluroxypyr 60 g/L + 2,4-MCPA 266,7 g/L) le 25 septembre 2012 puis sursemée le 3 octobre avec un semoir à disque de type Aitchison avec un mélange *Lolium perenne* L. variété Fellin (22 kg/ha) et *Trifolium repens* L. variété Alice (2,5 kg/ha).

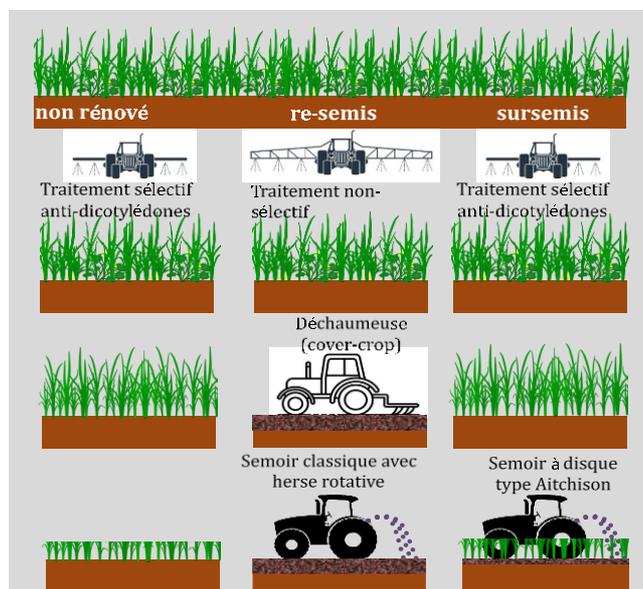


FIGURE 1 : Traitements effectués sur les trois sous-parcelles.

FIGURE 1 : Treatments applied to the three subplots.

Les stocks de carbone organique (SOC) et de matière organique (MO) ont été mesurés au moment de l'implantation (octobre 2012) dans le sol superficiel (0-10 cm). Ces valeurs étaient de $4,58 \pm 0,21$ kg C/m² (SOC)

et $8,92 \pm 0,25$ kg/m² (MO) pour la sous-parcelle témoin; de $5,25 \pm 0,36$ kg C/m² (SOC) et $9,04 \pm 0,29$ kg/m² (MO) pour la sous-parcelle en sursemis et de $4,79 \pm 0,23$ kg C/m² (SOC) et $9,22 \pm 0,33$ kg/m² (MO) pour la sous-parcelle en resemis. Ces valeurs n'étaient pas significativement différentes entre les 3 sous-parcelles avec en moyenne $4,88 \pm 0,15$ kg C/m² (SOC) et $9,06 \pm 0,15$ kg/m² (MO).

En 2013, ces trois sous-parcelles ont bénéficié d'une gestion commune. Elles ont reçu une fertilisation de 110 kg N/ha en deux passages (mars et juin) sous forme minérale. Elles ont été fauchées (en juin et en juillet) puis pâturées en deux fois : du 27 août au 9 septembre (34 vaches et 34 veaux, 8 jours suivi de 14 vaches tarées, 6 jours) puis du 18 au 23 octobre (35 vaches et 35 veaux, 6 jours).

1.2. Échantillonnage de la biomasse végétale

Pour ces trois sous-parcelles, une zone d'échantillonnage de 1000 m² a été établie. A chaque date de prélèvement, 10 réplicats sont prélevés. Les 10 points de prélèvement sont situés sur 2 diagonales et espacés de 10 m comme indiqué sur la figure 2. A chaque point de prélèvement, la végétation est prélevée sur une surface de 100 cm². Les points de prélèvements sont décalés de 1 m à chaque date de prélèvement.

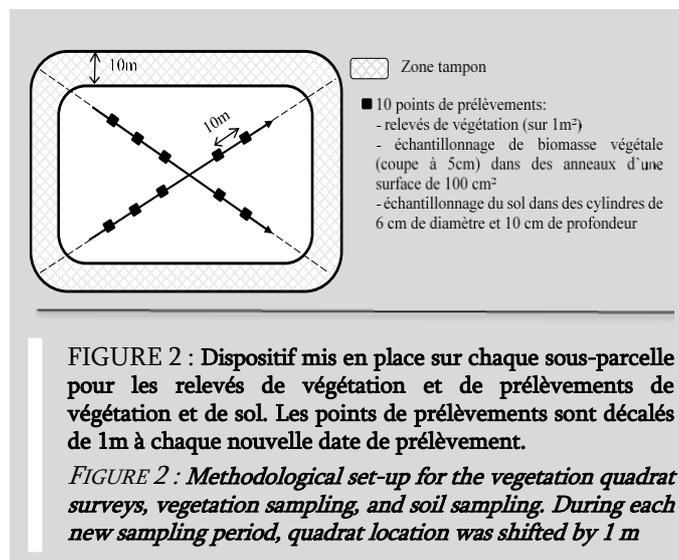


FIGURE 2 : Dispositif mis en place sur chaque sous-parcelle pour les relevés de végétation et de prélèvements de végétation et de sol. Les points de prélèvements sont décalés de 1m à chaque nouvelle date de prélèvement.

FIGURE 2 : Methodological set-up for the vegetation quadrat surveys, vegetation sampling, and soil sampling. During each new sampling period, quadrat location was shifted by 1 m

La biomasse végétale a été prélevée avant chaque période de fauche ou de pâturage de l'année 2013 et avant la première fauche en 2014 dans un anneau de 100 cm² au-dessus du niveau de coupe (5 cm). Les échantillons de biomasse végétale ont été séchés à l'étuve à 70 °C pendant au moins 48 h puis pesés.

Pour chaque sous-parcelle et à chaque point d'échantillonnage, l'abondance des espèces végétales a été estimée par le recouvrement relatif des espèces au printemps 2014 (20 mois après le resemis et le sursemis), dans des quadrats de 0,25 m². L'indice de diversité de Shannon (H') a été déterminé pour chaque sous-parcelle :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$$

avec S le nombre d'espèces et p_i le recouvrement relatif de l'espèce i .

1.3. Échantillonnage et analyses du sol

Pour les trois sous-parcelles, dix réplicats de sol ont été prélevés à chaque point d'échantillonnage au moment de la rénovation (octobre 2012) puis 8 mois (mai 2013) et 20 mois (mai 2014) après la rénovation des sous-parcelles resemis et sursemis, avant la première fauche annuelle de la parcelle. Les prélèvements ont été effectués dans l'horizon superficiel (0-10 cm) qui est le plus susceptible d'être influencé par les pratiques culturales. Le sol a été prélevé en utilisant un cylindre de 10 cm de profondeur et 6 cm de diamètre. La masse précise de chaque carotte de sol a été notée afin de calculer la densité apparente du sol. Les racines visibles, les résidus de plantes et d'animaux ainsi que les pierres ont été retirés à la main des échantillons de sol. Le sol a ensuite été tamisé à 2 mm. Une aliquote de sol a été congelée à -20°C pour analyser le C soluble ultérieurement. Le reste du sol a été séché à l'étuve à 70°C pendant au moins 48 h puis pesé. Les échantillons de sol ont été broyés au broyeur à billes en une poudre fine pour les analyses de C.

La masse de matière minérale (MM) du sol a été obtenue par pesée après combustion du sol sec à 375°C pendant 16 h au four à moufle (Ball, 1964). La masse de MO du sol a été calculée par la différence entre la masse totale et la masse de la MM du sol. Les teneurs en C et en N dans les échantillons de sol sec et de C dans la MM du sol ont été mesurées par un spectromètre de masse Isoprime (Elementar, Lyon, France) relié à un analyseur élémentaire (EA3000, Euro Vector, Milan, Italie). La teneur en C organique du sol a été déterminée par la différence entre la teneur en C total et en C minéral du sol. Les stocks de MO et de C organique (SOC) ont été exprimés en kg/m^2 à partir de la densité apparente du sol. Un facteur de correction prenant comme référence la densité apparente maximale a été appliqué afin de comparer les trois sous-parcelles et les dates d'échantillonnage pour une masse de sol équivalente (Ellert & Bettany, 1995).

L'extraction et l'analyse du C soluble à l'eau chaude a été réalisée en adaptant le protocole de Ghani *et al.* (2003). Pour chaque échantillon de sol, 3 g de matière sèche ont été placés dans un tube à centrifuger avec 30 mL d'eau distillée. Après mélange, le tube est placé dans un bain-marie à 80°C sous agitation pendant 16 h, puis centrifugé à 1160 g pendant 20 mn. Le surnageant a été filtré sous vide. Une aliquote (50 μL) du filtrat a été séchée sur du Chromosorb dans une capsule en étain et la teneur en C a été mesurée grâce à un spectromètre de masse IsoPrime (Elementar, Lyon, France) connecté à un analyseur élémentaire (EA3000, Euro Vector, Milan, Italie).

1.4. Statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 3.5.3, R Core Team, 2019). Pour chaque sous-parcelle les stocks de MO et de C organique (SOC) avant la rénovation et après la rénovation ont été comparés par des tests t de Welch. Les données ont ensuite été analysées par des ANOVAs suivies de tests de Tukey dans le cas d'un effet sous-parcelle significatif ($p < 0,05$). Au préalable, le test de Shapiro-Wilk (99 %) et le test de Bartlett (99 %) ont été réalisés sur chaque ensemble de données afin d'évaluer respectivement la normalité de leur distribution et l'homogénéité des variances. Les données de ratio C/N du sol, ne répondant pas aux conditions d'utilisation de tests paramétriques, ont été transformées ($\log(X)$).

2. Résultats

2.1. Effet de la rénovation sur la production fourragère et la composition floristique

Au cours de l'année qui a suivi la rénovation (2013), la sous-parcelle non rénovée a produit 10 t MS/ha de biomasse fourragère (Figure 3). Le renouvellement des sous-parcelles par resemis et sursemis a permis d'augmenter significativement la production ($F = 6,593$; $p < 0,01$) avec environ 15 t MS ha^{-1} . Les deux sous-parcelles rénovées produisent une quantité de fourrage annuelle comparable, mais différent dans la répartition de leur production au cours de l'année. La sous-parcelle sursemée a une production supérieure à celle de la resemée lors de la première récolte, alors que la sous-parcelle resemée offre de meilleurs résultats de production à la seconde récolte.

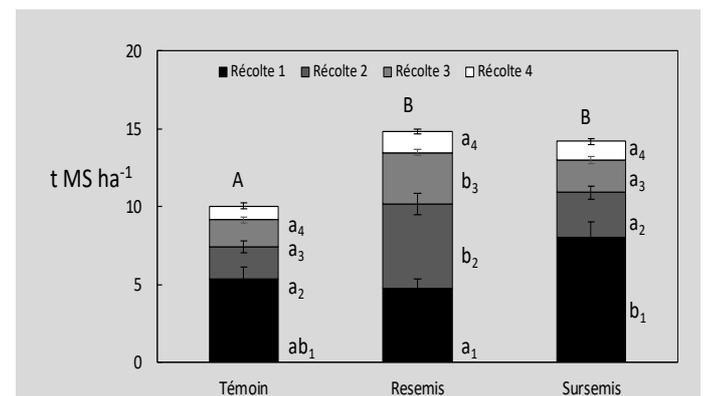


FIGURE 3 : Production (t MS/ha) pour chaque sous-parcelle et pour chaque récolte en 2013 (n + 1). Les valeurs sont des moyennes \pm erreurs standards (n = 10). Une lettre commune entre deux traitements indique que les moyennes ne sont pas significativement différentes (lettres majuscules pour le cumul des récoltes et lettres minuscules avec le numéro de chaque récolte).

FIGURE 3 : Biomass yield (t DM/ha) for each subplot during each sampling period in 2013 (n + 1)

D'un point de vue floristique, les trois sous-parcelles sont dominées par le pâturin commun (*Poa trivialis*) et le ray-grass anglais (*Lolium perenne*) qui représentaient respectivement 46% et 40% du recouvrement relatif. Au printemps 2014, soit 20 mois après la rénovation, le trèfle blanc (*Trifolium repens*) n'est présent que sur la sous-parcelle resemée, où il occupe 18 % du recouvrement relatif des espèces. Les trois sous-parcelles sont très peu diversifiées mais la sous-parcelle sursemée se distingue par une plus grande diversité ($H' = 1,75$) que la sous-parcelle non rénovée ($H' = 1,35$), la sous-parcelle resemée ne se différenciant pas significativement des deux autres ($H' = 1,58$) ($F = 10,59$; $p < 0,001$).

2.2. Stock de C et qualité de la MO du sol après rénovation

Le stock de MO dans la couche superficielle (0-10 cm) du sol n'a pas été modifié dans la sous-parcelle témoin entre la rénovation (septembre 2012) et mai 2014 ($F = 1,06$; ns) alors qu'il a significativement augmenté entre octobre 2012 et mai 2013 dans la sous-parcelle resemée ($t = 2,21$; $p < 0,05$) et entre octobre 2012 et mai 2014 dans la sous-parcelle sursemée ($t = 2,25$; $p < 0,05$). En mai 2013 et mai 2014, soit 8 et 20 mois après la rénovation, le stock de MO est ainsi significativement plus élevé dans la couche superficielle (0-10 cm) des sols des sous-parcelles rénovées que dans

le sol de la sous-parcelle non rénovée ($F = 6,61$; $p < 0,01$ pour 2013 et $F = 12,15$; $p < 0,001$ pour 2014) (Figure 4A). Cela correspond à une augmentation de la quantité de MO dans le sol superficiel d'environ 1 kg/m^2 au cours des mois qui suivent la rénovation.

Le stock de C organique (SOC) n'a pas été modifié significativement dans les différentes sous-parcelles entre la rénovation et mai 2014. Le SOC n'est ainsi pas significativement différent entre les sous-parcelles ni en mai 2013 ($F = 2,075$; ns), ni en mai 2014 ($F = 0,488$; ns) (Figure 4B). Il tend cependant à être plus élevé dans les sous-parcelles rénovées que dans la parcelle non rénovée avec une différence d'environ $0,5 \text{ kg C/m}^2$ (Figure 4B).

Le ratio C/N, indicateur de la stabilité de la matière organique, est plus élevé pour la sous-parcelle sursemée que pour la sous parcelle resemée en mai 2013, mais la différence n'est plus significative l'année suivante (Figure 4C). La proportion de C labile dans le C organique du sol (C soluble), mesurée uniquement en 2014, est proche de 4% et n'est pas différente entre les trois sous-parcelles ($F = 0,419$; ns).

3. Discussion

Cette étude vise à déterminer l'effet à court terme des techniques de rénovation par resemis et sursemis sur la production et le stock de C dans le sol. Le renouvellement des prairies a pour objectif d'augmenter la production de fourrage. Si les pratiques de labour permettent d'accroître la productivité, elles peuvent à l'inverse nuire aux stocks de C du sol. Le labour est en effet largement reconnu comme une pratique de gestion ayant un impact négatif sur le stock de C organique du sol des terres cultivées, en raison de la stimulation de la respiration du sol et des dommages causés à la structure du sol (Balesdent *et al.*, 2000 ; Liu *et al.*, 2006 ; Powlson *et al.*, 2011 ; Post *et al.*, 2012). C'est pour cela qu'on a comparé deux méthodes de rénovation : le resemis, qui est une méthode couramment utilisée, pour laquelle le semis est effectué après désherbage total et travail superficiel du sol (0-15 cm) et le sursemis, consistant en un semis sur une flore préexistante.

3.1. Réussite de la rénovation

La technique du sursemis est plus difficile à maîtriser qu'un resemis sur sol nu (Lemasson *et al.*, 2008 ; Pierre *et al.*, 2013). De nombreux facteurs tels que la période de sursemis, les conditions pédoclimatiques, la composition floristique et notamment la présence d'espèces produisant un feutrage comme *Agrostis stolonifera* qui gênent l'installation des semis, influencent la réussite du sursemis (Huguenin-Elie *et al.*, 2007 ; Lemasson *et al.*, 2008 ; Pierre *et al.*, 2013). En Normandie, lors d'un semis en automne il est par exemple recommandé de semer le ray-grass anglais et le trèfle blanc au plus tard

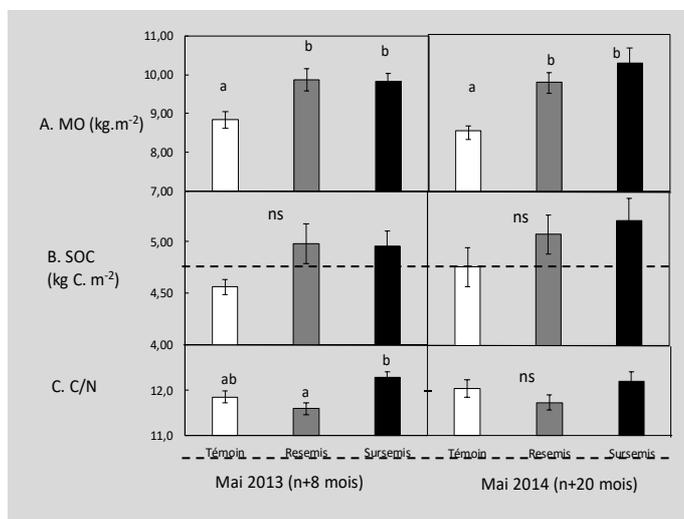


FIGURE 4 : (A) Matière organique du sol (MOstock, kg/m^2), (B) C organique du sol (SOC en kg C/m^2), (C) ratio C/N du sol pour l'horizon supérieur du sol (0-10cm) et pour chaque bloc, 8 et 20 mois après rénovation (mai 2013 et mai 2014). Les valeurs sont des moyennes \pm erreurs standards ($n = 10$). La valeur moyenne des stocks initiaux dans les sous-parcelles (MO et SOC en octobre 2012) est indiquée par une ligne pointillée et l'erreur standard est indiquée à côté de l'axe des ordonnées. Ns, non significatif.

FIGURE 4: (a) Levels of soil organic matter (MOstock, kg/m^2), (b) levels of organic carbon in the soil (SOCstock, kg C/m^2), and (c) the C/N ratio in the top 10 cm of the soil in each subplot at 8 and 20 months after the restoration methods were applied.

fin septembre (Lemasson *et al.*, 2008). Dans notre étude, le sursemis et le resemis effectués fin septembre ont permis d'obtenir une production annuelle équivalente (15 t MS/ha) et 1,5 fois plus élevée que pour le bloc non rénové. La plus forte quantité de fourrages a été produite à la première récolte pour le bloc sursemé, alors que la production de la végétation nouvellement implantée pour le bloc re-semé s'est accentuée plus tardivement.

Le choix des espèces et variétés utilisées pour le sursemis est orienté vers des espèces à installation rapide et suffisamment compétitives vis-à-vis de la végétation déjà en place (Lemasson *et al.*, 2008 ; Pierre *et al.*, 2013). Certaines variétés de ray-grass anglais et de trèfle blanc sont par exemple de bons candidats pour le sursemis de prairies pâturées (Lemasson *et al.*, 2008). Dans notre étude, le sursemis comme le resemis ont été réalisés avec du ray-grass anglais variété Fellin et du trèfle blanc variété Alice. Pour le bloc sursemé, une bonne implantation de la végétation a été obtenue en dépit de la présence d'une couverture végétale préexistante. Pour le bloc re-semé, la végétation se développe à partir d'un sol nu, et le développement de la végétation au printemps suivant l'implantation est plus tardif. La présence de légumineuses permet d'accroître la production de fourrage tout en limitant les apports en engrais azotés, et elle offre une meilleure qualité nutritive (matières azotées) ; (Gierus *et al.*, 2012). De plus, la présence des légumineuses dans les prairies peut être bénéfique pour les bilans de gaz à effet de serre en améliorant la production et donc les entrées de C dans le sol (De Deyn *et al.*, 2009) et en réduisant l'utilisation des engrais azotés (Arrouays *et al.*, 2002). Dans notre étude, malgré une proportion de trèfle blanc dans le mélange semé proche pour les deux sous-parcelles rénovées (2,5 kg/ha pour le sursemis et 2 kg/ha pour le resemis), le trèfle blanc s'est uniquement implanté dans le bloc resemé (18 %). Son implantation dans un couvert végétal en place, dans le cas du sursemis, est plus difficile que sur un sol nu. L'absence de fauche de nettoyage après les semis peut également avoir pénalisé le trèfle en limitant l'accès à la lumière et en favorisant le couvert en place. L'évolution de la sélection variétale en culture mixte plutôt qu'en monoculture pourrait permettre de développer des variétés plus compétitives vis-à-vis des Poacées comme la variété Giga du trèfle blanc (Annichiarico & Proietti, 2010) et donc plus adaptées au sursemis. D'autre part, le maintien du trèfle blanc en prairie est conditionné par une faible teneur en azote minéral dans le sol (Loiseau *et al.*, 2001) ce qui n'est pas le cas dans cette étude où les parcelles expérimentales ont été fertilisées.

3.2. Stocks de C

Notre étude des stocks de C du sol porte sur l'horizon superficiel (0-10 cm) qui est le plus touché par le labour (Linsler *et al.*, 2013). Elle indique que les deux méthodes de rénovation, resemis et sursemis, ne réduisent pas les stocks de C organique d'après les

analyses réalisées 8 et 20 mois après rénovation. Le ratio C/N, indicateur de la stabilité de la MO dans l'horizon superficiel, ainsi que la proportion de C soluble, indicateur de l'activité des micro-organismes et de la décomposabilité de la matière organique (Sparling *et al.*, 1998 ; Ghani *et al.*, 2003), ne sont pas modifiés 20 mois après la rénovation. Cela suggère que le fonctionnement du sol n'a été que peu ou pas modifié par les deux modes de rénovation. Dans le cas du resemis le travail du sol est limité à une profondeur de 15 cm, et dans le cas du sursemis le travail du sol se limite à la formation de sillons pour réaliser le semis. Le sol est ainsi moins perturbé que par un labour. Dans notre expérimentation, ce maintien du stock de C organique est même accompagné d'une augmentation de la quantité de MO pour les deux modes de rénovation. Ces stocks de C plus élevés sont probablement liés à de plus fortes productions de biomasse et donc une plus forte fixation de C par le couvert végétal mais les mesures effectuées à court terme ne permettent pas d'extrapoler sur le stockage de C à plus long terme. Nos résultats suggèrent cependant que ces techniques de rénovation pourraient maintenir voire augmenter le stockage de C dans le sol à court terme. Des études dans des contextes pédo-climatiques variés et avec un plus grand nombre de parcelles apparaissent évidemment nécessaires pour préciser l'impact des techniques de rénovation sur le stockage de C dans les sols prairiaux.

4. Conclusion

En conclusion, cette étude indique que les techniques de rénovation par sursemis et resemis, qui impactent peu le fonctionnement du sol, pourraient permettre de ne pas réduire le stock de C tout en améliorant la production. Comparé au sursemis, le resemis présente l'avantage d'une meilleure implantation du trèfle blanc. En revanche, dans le cas de prairies ayant une forte diversité spécifique, le resemis ne permet pas le maintien de la biodiversité en raison du renouvellement total de la végétation.

Remerciements : Ces travaux de recherche ont été appuyés par le Conseil Régional de Basse-Normandie, l'Université de Caen Basse-Normandie et l'INRAE. Nous remercions B. Blanchet et le personnel technique du Domaine Expérimental INRAE du Pin-au-Haras pour leur collaboration ainsi que le personnel technique de l'UMR EVA. Nous remercions la plate-forme PLATIN' (Plateau d'Isotopie de Normandie) pour la réalisation des analyses élémentaires utilisées dans cette étude.

Article accepté pour publication le 22 juillet 2020

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2011). "Réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre : filière agricole et agro-alimentaire". ADEME, 132p.
- Annichiarico P., Proietti S (2010). "White clover selected for enhanced competitive ability widens the compatibility with grasses and favours the optimization of legume content and forage yield in mown clover-grass mixtures". *Grass Forage Sci.*, 65, 318-324.

- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (eds.) (2002). "Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?" *Expertise scientifique collective*, INRA edn. Paris, 332p.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M. (2000). "Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage". *Soil & Tillage Research*, 53, 215–230.
- Ball D.F. (1964). "Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils". *J. Soil Sci.*, 15, 84–92.
- De Deyn G.B., Quirk H., Yi Z., Oakley S., Ostle N.J., Bardgett R.D. (2009). "Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility". *J. Ecol.*, 97, 864–875.
- DeGryze S., Six J., Paustian K., Morris S.J., Paul E.A., Merckx R. (2004). "Soil organic carbon pool changes following land-use conversions". *Global Change Biol.*, 10, 1120–1132.
- Dumont B., Ryschawy J., Duru M., Benoit M., Chatellier V., Delaby L., Donnars C., Dupraz P., Lemauviel-Lavenant S., Méda B., Vollet D., Sabatier R. (2019). "Review: Associations among goods, impacts and ecosystem services provided by livestock farming". *Animal*, 13, 1773–1784.
- Ellert B.H., Bettany J.R. (1995). "Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes". *Can. J. Soil Sci.*, 75, 529–538.
- Gaillard C., Mougenot C., Granger S. Petit S. (2017). "Increasing herd sizes on Franche-Comte daily farms place grazing systems under strain". *Fourrages*, 230, 11–14.
- Gaujour E., Amiaud B., Mignolet C., Plantureux S. (2012). "Factors and processes affecting plant biodiversity in permanent grasslands. A review". *Agron. sustain. dev.*, 32, 133–160.
- Ghani A., Dexter M., Perrott K.W. (2003). "Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation". *Soil Biol. Biochem.*, 35, 1231–1243.
- Gierus M., Kleen J., Loges R., Taube F. (2012). "Forage legumes species determine the nutritional quality of binary mixtures with perennial ryegrass in the first production year". *Anim. Feed Sci. Technol.*, 172, 150–161.
- Huguenin-Elie O., Stutz C.J., Luescher A., Gago R. (2007). "Grassland improvement by overseeding". *Rev. Suisse Agric.*, 39, 25–29.
- Kizekova M., Hopkins A., Kanianska R., Makovnikova, Pollak S., Palka B. (2017). "Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy; Slovakia as a case study". *Grass Forage Sci.*, 56, 73, 218–232.
- Lemasson C., Osson B., Pierre P. (2008). "Rénovation des prairies et sursemis. Comprendre, raisonner et choisir la méthode". *Fourrages*, 195, 315–330.
- Linsler D., Geisseler D., Loges R., Taube F., Ludwig B. (2013). "Temporal dynamics of soil organic matter composition and aggregate distribution in permanent grassland after a single tillage event in a temperate climate". *Soil & Tillage Research*, 126, 90–99.
- Liu X., Herbert S.J., Hashemi A.M., Zhang X., Ding G. (2006). "Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation—a review". *Plant Soil Environ.*, 52, 531–543.
- Loiseau P., Soussana J.F., Louault F., Delpy R. (2001). "Soil N contributes to the oscillations of the white clover content in mixed swards of perennial ryegrass under conditions that simulate grazing over five years". *Grass Forage Sci.*, 56, 205–217.
- Pierre P., Deleau D., Osson B. (2013). "Quel entretien pour les prairies permanentes? De l'amélioration par les pratiques à la rénovation totale". *Fourrages*, 213, 45–54.
- Post W.M., Izaurralde R.C., West T.O., Liebig M.A., King A.W. (2012). "Management opportunities for enhancing terrestrial carbon dioxide sinks". *Front. Ecol. Environ.*, 10, 554–561.
- Powlson D.S., Whitmore A.P., Goulding K.W.T. (2011). "Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false". *Eur. J. Soil Sci.*, 62, 42–55.
- Puydarrieux P., Devaux J. (2013). "Quelle évaluation économique pour les services écosystémiques rendus par les prairies en France métropolitaine?" *Notes et études socio-économiques*, 51–86.
- Sparling G., Vojvodic-Vukovic M., Schipper L.A. (1998). "Hot-water soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C". *Soil Biol. Biochem.*, 1469–1472.
- Soussana J.F., Lemaire G. (2014). "Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems". *Agricul., Ecosyst. Environ.*, 190, 9–17.
- Soussana J.F., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E., Balesdent J., Chevallier T., Arrouays D. (2004). "Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands". *Soil Use Manage.*, 20, 219–230.
- Tasset E., Morvan-Bertrand A., Amiaud B., Cliquet J.B., Louault F., Klumpp K., Vecrin R., Mishler P., Husse S., Lemauviel-Lavenant S. (2019). "Des bouquets de services écosystémiques rendus par les prairies permanentes de fauche". *Fourrages*, 237, 83–93.

—
|
|