



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

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

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Stockage de carbone dans le sol sous prairies en pâturage tournant dynamique

C. Lemoine¹, A. Poilane², J. Cliquet², F. Gastal¹

L'objectif de l'étude était d'évaluer l'importance des stocks et de la vitesse de stockage (ou de déstockage) de carbone dans le sol sous des prairies engagées en pâturage tournant dynamique (PTD), et de rechercher des facteurs de milieu favorables (ou défavorables). Le PTD se caractérise par un temps de séjour des animaux court et une hauteur d'herbe en sortie plus élevée que dans un pâturage tournant traditionnel.

RESUME

L'étude a été conduite sur un réseau de 35 parcelles situées dans la moitié nord des Deux-Sèvres, dans le cadre du projet LIFE Pâturage Tournant Dynamique (Poilane et al., 2020). Le stockage de carbone dans le sol (0-75 cm) a été évalué à partir de la mesure de l'évolution des stocks de carbone du sol entre 2015 et 2019. Les stocks totaux de carbone sur l'ensemble du profil (0-75cm) variaient selon la zone géoclimatique (Gâtine, Bressuirais, Thouarsais), le statut temporaire ou permanent des prairies, et la teneur en argile et en gravier des sols. En moyenne sur le réseau, le stockage de carbone a été évalué à $1,36 \pm 0,88$ t C/ha/an (0-75cm). Cette valeur moyenne positive masquait toutefois une forte hétérogénéité de situations, avec des parcelles stockantes (26/35) et des parcelles déstockantes (9/35). La vitesse de stockage de carbone sur l'ensemble du profil de sol était affectée par la teneur en argile des sols et par la valeur initiale du stock de carbone du sol à la première date d'observation. En moyenne sur le réseau de prairies, le stock de carbone a augmenté significativement entre les deux dates de prélèvement dans l'horizon 25-50 cm mais pas dans l'horizon de surface (0-25 cm), montrant le rôle important que peuvent avoir les horizons plus profonds que l'horizon 0-30 cm, généralement considéré dans les études de stockage de carbone. Toutefois, c'est dans l'horizon de surface (0-25 cm) que la vitesse de stockage de carbone variait le plus, pouvant être positive (stockage) mais aussi souvent négative (destockage).

SUMMARY

Carbon storage in the soil under meadows in dynamic rotating pasture

This study was carried out on a network of 35 plots located in the northern half of Deux-Sèvres, as part of the LIFE DRG (Dynamic Rotational Grazing) project (Poilane et al., 2020). Carbon storage in the soil (0-75 cm) was evaluated by measuring the evolution of soil carbon stocks between 2015 and 2019. Total carbon stocks over the entire profile (0-75cm) varied according to the geoclimatic zone (Gâtine, Bressuirais, Thouarsais), the temporary or permanent status of the meadows, and the clay and gravel content of the soils. On average over the network, carbon storage was evaluated at 1.36 ± 0.88 t C / ha / year (0-75cm). This positive average value, however, masked a strong heterogeneity of situations, with stocking plots (26/35) and destocking plots (9/35). The rate of carbon storage over the entire soil profile was affected by the clay content of the soils and the initial value of the soil carbon stock at the earliest date of observation. On average over the grassland network, the carbon stock increased significantly between the two sampling dates in the 25-50 cm horizon but not in the surface horizon (0-25 cm), showing the important role that can have the horizons deeper than the 0-30 cm horizon, which is usually considered in carbon storage studies. However, it is in the surface horizon (0-25 cm) that the rate of carbon storage varied the most, being able to be positive (storage) but also often negative (destocking).

Introduction

Les prairies sont aujourd'hui reconnues comme des agro-écosystèmes ayant un potentiel de stockage de carbone organique dans le sol important, nettement plus élevé que le potentiel de stockage de carbone des cultures annuelles et équivalent à celui des forêts (Arrouays et Deslais, 1999 ; Arrouays, 2002 ; Angers et al., 2020). De ce fait, la connaissance et la préservation

des surfaces en prairie dans les paysages agricoles revêt une importance particulière vis-à-vis des questions d'atténuation de l'impact des gaz à effet de serre et de lutte contre le changement climatique (Lemaire et al., 2016).

Le potentiel de stockage de carbone des prairies se traduit à la fois par des stocks de carbone élevés (50 à plus de 100 t C/ha), d'autant plus que les prairies sont âgées (prairies permanentes), et par une vitesse de

AUTEURS

1 : INRAE, UE FERLUS, 86600, Lusignan, France, Francois.Gastal@inrae.fr

2 : CAVEB, 79200 Parthenay, France

MOTS-CLES : Prairies, stockage de carbone, sol, pâturage tournant dynamique, pédo-climat

KEY-WORDS: Grasslands, carbon storage, soil, dynamic rotational grazing, pedo-climate

REFERENCE DE L'ARTICLE : Lemoine C., Poilane A., Cliquet J., Gastal F., (2021). «Stockage de carbone dans le sol sous prairies en pâturage tournant dynamique », Fourrages 248, 1-10

stockage importante lorsqu'elles sont jeunes (Arrouays, 2002; Smith, 2014). Dans les années qui suivent l'implantation d'une prairie, la vitesse de stockage de carbone peut atteindre 0,5 à 1,0 t C/ha/an sur au moins une dizaine d'années (Angers *et al.*, 2020). Au-delà, la vitesse de stockage du carbone diminue progressivement avec l'âge de la prairie (Franzluebbers *et al.*, 2000, 2014 ; Johnson *et al.*, 2017). La durée au bout de laquelle le stock de carbone des prairies françaises peut s'approcher d'un plafond, et la hauteur de ce plafond, restent encore incertains, d'autant qu'ils dépendent fortement des conditions de sol et de climat (Angers *et al.*, 2020). En revanche, il est bien établi que la destruction d'une prairie se traduit par une perte rapide de carbone du sol, qui peut facilement atteindre -20 à -30 % du stock présent dans l'horizon 0-30 cm avant la destruction de la prairie, sur une à quelques années (Vertès *et al.*, 2007 ; Vertès et Mary, 2007 ; Zani *et al.*, 2020).

Le plus grand potentiel de stockage de carbone sous prairie, comparativement à un système de cultures annuelles, est lié à la permanence de l'activité de la végétation prairiale, contrairement aux interruptions de végétation qui interviennent dans les successions de cultures annuelles. Notamment, les apports racinaires de carbone jouent un rôle important dans le stockage de carbone sous prairie, comparativement aux cultures annuelles (Rasse *et al.*, 2005 ; Katterer *et al.*, 2011). L'absence de labour et de changement consécutif de structure et d'aération du sol, qui peuvent engendrer une déstabilisation des matières organiques, semblent aujourd'hui des facteurs moins importants qu'il n'était considéré antérieurement (Powlson *et al.* 2014 ; Mary *et al.*, 2020). La biodiversité (vers de terre, micro-faune, micro-organismes, etc...), plus importante en prairie qu'en culture, pourrait aussi contribuer à l'incorporation de la matière organique dans le sol sous prairie, mais son effet reste encore à démontrer clairement (Blouin *et al.*, 2013).

Les prairies françaises sont soumises à une diversité de modes de gestion (Huyghe, 2005). Ces prairies sont d'âges très variés (prairies temporaires, de 1 à 5 ans, prairies permanentes, de 6 ans et plus). Leur mode d'exploitation varie de manière importante (fauche, pâturage ou, le plus fréquemment, exploitation mixte ; pâturage tournant, continu), de même que leur conduite agronomique (niveaux de fertilisation minérale, organique).

Les modalités de gestion des prairies peuvent affecter leur capacité à stocker du carbone dans le sol (Abdalla *et al.*, 2018, Byrnes *et al.*, 2018). En particulier les prairies pâturées montrent un stockage plus élevé que les prairies fauchées (Senapati *et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2014 ; Eze *et al.*, 2018). Parmi les prairies pâturées, l'intensité de pâturage peut avoir un impact sur la capacité de stockage (McSherry et Ritchie, 2013). Le niveau de production végétale, qui dépend notamment de la gestion de la fertilité du sol, impacte aussi

positivement le stockage de carbone dans le sol (Soussana et Lemaire, 2014).

Une technique de pâturage dite « Pâturage Tournant Dynamique » (PTD) est proposée depuis quelques années par certains organismes de conseil agricole. S'inspirant de principes exposés par Voisin (1957), cette technique se base sur l'observation et le respect de la physiologie des plantes (Bessière et Bessière, 2020). En particulier, l'entrée, la sortie et le temps de séjour maximal des animaux sont calés sur des stades de développement des plantes. Cette méthode est notamment mise en œuvre sur un réseau d'exploitations d'élevage des Deux-Sèvres.

La présente étude a pour objectif de quantifier les stocks et la vitesse de stockage (ou de déstockage) de carbone dans le sol sous des prairies engagées en pâturage tournant dynamique, et de déterminer les facteurs favorables (ou défavorables) au stockage. Elle a été conduite sur un réseau de 35 parcelles (1 ou 2 parcelles par exploitation) décrites plus en détail par ailleurs (Poilane *et al.*, 2020 ; Lemoine *et al.*, 2021). Réparties sur les zones d'élevage du nord des Deux-Sèvres, ces parcelles couvraient une diversité pédoclimatique locale importante.

1. Matériel et méthodes

1.1. Contexte du réseau de parcelles

Dans le cadre du projet LIFE Pâturage Tournant Dynamique (Poilane *et al.* 2020), un réseau de 35 parcelles a été identifié. Les parcelles ont été échantillonnées de 2015 à 2019. Leur gestion, leur composition botanique et leur production végétale ont été mesurées de manière systématique. Ces aspects sont décrits et analysés plus en détail dans un article compagnon (Lemoine *et al.*, 2021). Ils sont rappelés brièvement ici. Sur la base des paramètres climatiques et notamment de la pluviométrie annuelle estimée sur chaque parcelle, trois groupes de parcelles ont été constitués (Figure 1, reprise de Lemoine *et al.*, 2021 et remontrée ici pour resituer la présente étude): les parcelles de Gâtine (21 parcelles, pluviométrie annuelle moyenne de 857 mm/an), du Bressuirais (8 parcelles, pluviométrie annuelle moyenne de 741 mm/an) et du Thouarsais (6 parcelles, pluviométrie annuelle moyenne de 583 mm/an). Ce gradient de pluviométrie résulte de la conjonction du relief, faible mais impactant pour la climatologie locale, et du régime ouest de vents dominants. Des gradients non négligeables de rayonnement solaire et de température en résultaient aussi (température moyenne de l'air sur la période 2015-18 de 12.2°C et 12.8°C respectivement en Gâtine et dans le Thouarsais). La production d'herbe valorisée était, en moyenne sur les 5 années d'étude, de 6,5 t/ha sur les parcelles de Gâtine, 4,3 t/ha dans le Bressuirais et 3,5 t/ha dans le Thouarsais.

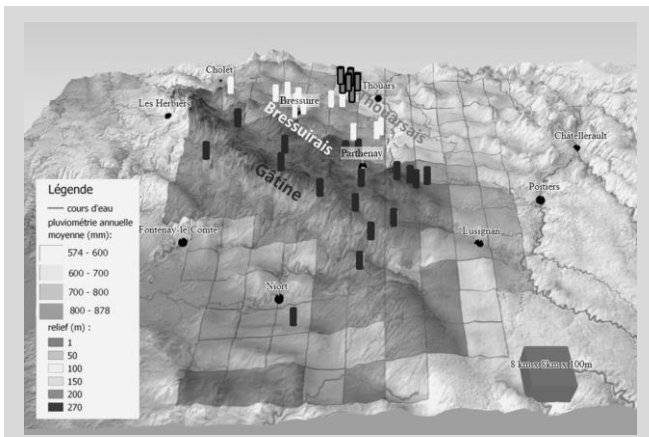


FIGURE 1 : Topographie de la zone d'étude et répartition spatiale de la pluviométrie annuelle moyenne de 2015 à 2018. Les cylindres représentent l'emplacement des 35 paddocks étudiés (Foncé : Gâtine ; Clair : Bressuirais ; gris cerné de noir : Thouarsais ; sources : BRGM, IGN et Météo-France).

Figure 1: Topography of the study area and spatial distribution of average annual rainfall from 2015 to 2018.

Les caractéristiques générales des sols (pH, granulométrie, concentrations en minéraux, profondeur) ont été analysées à partir des prélèvements effectués également pour déterminer leur teneur en carbone (cf. 1.2.). La majorité des parcelles (25/35) se trouvait sur roche mère volcanique ou métamorphique, avec des sols limoneux (majorité des parcelles du Bressuirais, parcelles de l'ouest de la Gâtine) à limono-sableux (surtout les parcelles du Thouarsais). Les autres parcelles étaient situées sur bassin sédimentaire, avec des sols plus argileux (parcelles de la partie est de la Gâtine). La profondeur des sols, la granulométrie, la proportion de cailloux et les teneurs en minéraux variaient également largement au sein de ces 2 sous-ensembles de parcelles. La majorité des sols étaient à tendance légèrement acide (pH_{eau} moyen de 6,3, variant entre 5,0 et 8,0).

Durant la période d'étude, les parcelles étaient pâturées soit par des bovins allaitants (16 parcelles), laitiers (11 parcelles) ou par des ovins viande (8 parcelles). La majorité des parcelles (28/35) étaient pâturées selon un protocole de pâturage tournant dynamique (méthode Herby®, Poilane *et al.*, 2020). Brièvement, cette technique repose sur les principes suivants :

- attendre que le stade 3 feuilles soit atteint pour commencer à pâturer ;
- enlever les animaux des paddocks avant qu'ils commencent à pâturer la gaine des graminées ;
- limiter le temps de présence des animaux sur la parcelle à trois jours au maximum pour ne pas pâturer les nouvelles repousses de feuilles des graminées.

La mise en œuvre de ces principes conduit à un cloisonnement plus important des paddocks que dans le pâturage tournant intensif conventionnel.

Le pâturage conduit sur les parcelles en PTD de la présente étude (28 parcelles sur 35) se caractérisait par un chargement instantané compris entre 60 et 150 UGB/ha selon le potentiel de production des surfaces et la capacité d'ingestion des UGB pâturant, un nombre moyen de 4,4 cycles de pâturage par an et un temps de retour moyen de 64,8 jours. Le temps de présence des animaux était de 0,5 à 3 jours selon les exploitations. Par rapport aux pratiques de pâturage habituelles sur la zone d'étude, le pâturage PTD s'est ainsi distingué par un temps de présence court, un chargement instantané élevé, un temps de retour variable selon les saisons, une hauteur d'entrée plus faible au printemps et une hauteur de sortie plus haute. Sur le réseau des 35 parcelles, 7 autres parcelles n'étaient pas soumises aux modalités de PTD mais étaient gérées en mode mixte alternant un pâturage tournant plus extensif et de la fauche. Dans la suite de l'étude, ces parcelles sont dénommées parcelles en « pâturage non-PTD ».

Les prairies étaient à l'origine semées en mélanges multi-espèces. Leur âge en début d'étude variait entre 1 à 10 ans (à l'exception de 2 prairies plus anciennes dont l'âge n'est pas connu). Les prairies de 1 à 5 ans à la première date d'observation (16/35 parcelles) ont été qualifiées de « temporaires » selon la définition du Ministère de l'Agriculture (bien que quelques-unes aient atteint un peu plus de 6 ans en fin de projet). Les prairies âgées de 6 ans ou plus à la première date d'observation (19/35) ont été qualifiées de « permanentes ». L'âge des prairies à la première date de prélèvement variait de 1 à 5 ans (moyenne de 1,8 an) pour les prairies temporaires, et de 6 à 10 ans (moyenne de 8 ans) pour les prairies permanentes.

1.2. Prélèvements et analyses de sol

Pour déterminer la teneur en carbone, la granulométrie et la composition en minéraux, des prélèvements de sol ont été effectués sur chaque parcelle en 3 zones, alignées et équidistantes entre elles et les bords du paddock. Sur chaque zone, les prélèvements ont été réalisés en 4 points, à la tarière (diamètre 5,5 cm) et en trois horizons (0-25, 25-50 et 50-75 cm) lorsqu'il était possible d'atteindre cette dernière profondeur. La profondeur prélevée était notée systématiquement. Les 4 prélèvements par zone et par profondeur ont été regroupés en 1 échantillon unique. Les échantillons de sol (3 profondeurs x 3 zones = 9 échantillons par parcelle au total) ont été prélevés sur chaque parcelle à deux dates successives : une première date de prélèvement avant la mise en pâturage tournant dynamique (P_1 , mars 2015 ou mars 2016 selon les parcelles) et une seconde date (P_2 après 3 à 4 années de pâturage, en mars 2019). Les zones de prélèvement ont été géo-référencées pour que le second prélèvement soit effectué à proximité (2 à 3 m) du premier.

Au laboratoire, le sol a été séché à l'air libre pendant plusieurs mois, broyé et tamisé pour séparer la fraction grossière (> 2 mm) et les racines de la fraction fine (< 2 mm), par profondeur et par zone de prélèvement. La fraction fine a été reprise pour broyage et tamisage plus fin (<200 µm) avant analyse chimique et détermination de l'humidité résiduelle (séchage à l'étuve à 80 °C). La teneur en carbone organique total (mg C/g sol sec) a été mesurée par la méthode de Dumas sur un analyseur élémentaire (Flash 2000, ThermoFisher).

La densité apparente du sol a été mesurée en mars 2019 en prélevant un autre volume de sol (18 x 18 cm² sur 25 cm de profondeur soit 8,1 litres) sur chaque zone, à la bêche pour le premier horizon et à la tarière (diamètre 5,5 cm) sur la profondeur 25-75 cm. Le volume de sol prélevé a été déterminé en mesurant *in situ* le volume d'eau déversé dans le trou du prélèvement (utilisation d'un sac fin et étanche, épousant au mieux les surfaces du prélèvement). Le sol prélevé a été séché à l'étuve à 80°C, pesé, broyé et séparé en deux fractions granulométriques (< 2 mm et > 2 mm), chacune pesée. Le volume de la fraction > 2 mm a été mesuré par déplacement d'eau pour en déduire la proportion volumique de terre fine (< 2 mm) et de gravier (> 2 mm), ou pierrosité.

La quantité de carbone de chaque horizon (t C/ha) a été calculée à partir de la teneur en carbone de l'horizon (mg C/g sol), de sa masse volumique de terre fine (g/cm³), de sa proportion volumique de terre fine et de sa hauteur (cm), selon l'équation (FAO, 2019):

stock de carbone = teneur en carbone x densité apparente de terre fine x proportion volumique de terre fine x 0,1 x hauteur de l'horizon

Le stock total de carbone sur 0-75 cm (t C/ha) a été calculé comme la somme des quantités de carbone par horizon. La vitesse de stockage de carbone (t C/ha/an) a été calculée comme la différence de stock de carbone entre les 2 dates de prélèvement, divisée par la durée entre les 2 prélèvements. Elle a été calculée par horizon et sur le total du profil (0-75 cm).

Les échantillons de terre fine ont également servi à la détermination de la granulométrie et de la teneur en minéraux par un laboratoire extérieur accrédité.

1.3. Analyses statistiques

Les variables de teneur et de stock de carbone par horizon (0-25, 25-50 et 50-75 cm) et de stock total sur toute la profondeur de sol explorée (0-75 cm), ont été analysées selon un modèle linéaire à effets mixtes (fonction « lme » du package « nlme », logiciel R, version 4.0.2), considérant la parcelle comme effet aléatoire et comme effets fixes les facteurs « zone géographique » (Gâtine, Bressuirais, Thouarsais), « type de prairie » (permanente ou temporaire), « date de prélèvement » (T₀, T_{4ans}), « mode de gestion de la prairie » (pâturage PTD ou non PTD), et les variables quantitatives « teneur en

argile » et « proportion de terre fine ». Le modèle retenu a été choisi et affiné en éliminant certaines variables pour lesquelles les interactions n'étaient pas significatives, et en comparant les modèles sur la base du critère d'Akaike.

La vitesse de stockage de carbone a été analysée en ajoutant au modèle statistique précédent le facteur teneur initiale en carbone. De manière globale, très peu d'interactions entre facteurs ont été observées aussi bien sur les teneurs que sur les stocks de carbone. Les moyennes ont été comparées par le test de Student ou le test de Wilcoxon, dans le respect d'application des tests. La significativité des effets est définie par la p-value [significatif (*), très significatif (**), ou hautement significatif (***) pour respectivement p < 0,05, p < 0,01 et p < 0,001 ; non significatif (NS) pour p > 0,05 sauf si spécifié différemment].

2. Résultats et discussion

2.1. Effet du contexte pédoclimatique et du type de prairie sur le stock de carbone du sol

Les teneurs (données non montrées) et les stocks de carbone du sol étaient plus élevés pour les parcelles de Gâtine, un peu plus faibles pour les parcelles du Bressuirais et nettement plus faibles pour celles du Thouarsais (p<0,001), aussi bien dans chaque horizon (données non montrées) que sur le total des 3 horizons (Tableau 1A; Figure 2A). Ces différences peuvent s'expliquer d'une part par des sols généralement plus profonds en Gâtine et dans le Bressuirais que dans le Thouarsais, et d'autre part par la production de biomasse végétale plus élevée dans les parcelles de

A : stockage total de carbone		
Facteur	Significativité	
Date de prélèvement (P1 vs P2)	0,004	**
Zone géographique	<0,001	***
Type de prairies (temporaire ou permanente)	0,046	*
Mode de gestion (PTD ou non PTD)	0,934	NS
% de gravier	0,001	**

B : vitesse de stockage du carbone total		
Facteur	Significativité	
Stock initial de C total	0,001	**
Zone géographique	0,490	NS
Type de prairie (temporaire ou permanente)	0,522	NS
Mode de gestion (PTD ou non PTD)	0,381	NS
% d'argile	0,499	NS
% de gravier	0,813	NS
Stock total de C x % d'argile	0,013	*

TABLEAU 1 : Analyse de variance sur les variables stock (A) et vitesse de stockage (B) de carbone total (0-75 cm) dans le sol. La significativité est indiquée par la p-value de l'analyse de variance
Table 1: Analysis of variance on the variables stock (A) and storage rate (B) of total carbon (0-75 cm) in the soil.

Gâtine et du Bressuirais que dans celles du Thouarsais, résultant d'une pluviométrie plus forte en Gâtine et dans le Bressuirais que dans le Thouarsais (cf. Matériel et Méthodes ; Lemoine *et al.*, 2021). En effet, le stockage de carbone dans le sol est généralement considéré comme dépendant, entre autres facteurs, de la production de biomasse et donc de l'entrée de carbone dans l'ensemble du système sol-plante (Soussana et Lemaire, 2014). Les valeurs de stock de carbone observées dans le Bressuirais et la Gâtine,

respectivement en moyenne de 80,7 et 97,9 t C/ha sur l'ensemble du profil 0-75cm, sont comparables à la moyenne nationale sur prairie, évaluée à 85 t C/ha sur 0-30 cm seulement, mais prenant en compte les prairies d'altitude, qui accumulent souvent plus de carbone (Angers *et al.*, 2020). En revanche les valeurs observées dans le Thouarsais, en moyenne de 54,9 t C/ha, sont nettement plus faibles que les valeurs nationales.

En moyenne sur l'ensemble du réseau observé, les prairies permanentes avaient des stocks de carbone total qui étaient plus élevés ($97,0 \pm 32,2$ t C/ha) que ceux des prairies temporaires ($78,2 \pm 19,1$ t C/ha) ($p < 0,001$; Figure 2B). Cette observation s'accorde avec la littérature montrant que le stock de carbone du sol est plus élevé sous les prairies âgées (prairies permanentes de longue durée, prairies naturelles) que sous les prairies plus jeunes (Arrouays, 2002). Outre l'effet âge *stricto sensu*, le maintien des prairies au cours du temps implique aussi l'évolution d'autres facteurs qui sont indissociablement liés à l'âge, parmi lesquels se trouvent la composition floristique (évolution décrite sur les présentes prairies dans Lemoine *et al.*, 2021) ou la biodiversité, qui peuvent aussi conduire à des différences de stock de carbone entre prairies temporaires et prairies permanentes.

En revanche, aucun effet significatif du type de pâturage (PTD ou non PTD) n'a été mis en évidence ni sur le stock total 0-75 cm (Tableau 1A), ni sur les stocks par horizon ou sur la teneur en carbone des sols (données non montrées).

Toujours en moyenne sur l'ensemble du réseau, le stock total de C diminuait avec le pourcentage de gravier (Tableau 1A), de manière logique puisque les graviers (fractions > 2mm) occupent un volume de sol mais sont dépourvus de carbone organique. La teneur en argile du sol n'avait pas d'effet significatif sur le stock de carbone total, mais on notait un effet significatif de la teneur en argile sur la teneur en carbone dans l'horizon 0-25 cm, tandis que la teneur en argile n'affectait pas la teneur en carbone des horizons plus profonds (Figure 3). La teneur en argile est un facteur connu pour favoriser la teneur en carbone des sols, notamment *via* la formation du complexe argilo humique (Balesdent, 2020). Elle diminue l'accessibilité de la matière organique aux micro-organismes.

2.2. La vitesse de stockage (ou de déstockage) de carbone total du sol (0-75 cm) dépend du stock initial de carbone

En moyenne sur l'ensemble des parcelles et sur la profondeur totale prospectée (0-75 cm), la quantité totale de carbone mesurée au second prélèvement était significativement plus élevée que celle mesurée au premier prélèvement (Tableau 1A). En moyenne toujours sur l'ensemble des parcelles observées, les sols des prairies ont stocké $5,74 \pm 2,96$ t C/ha entre les deux dates de prélèvement, ce qui correspond à une vitesse moyenne de stockage de $1,36 \pm 0,88$ t C/ha/an. Cette

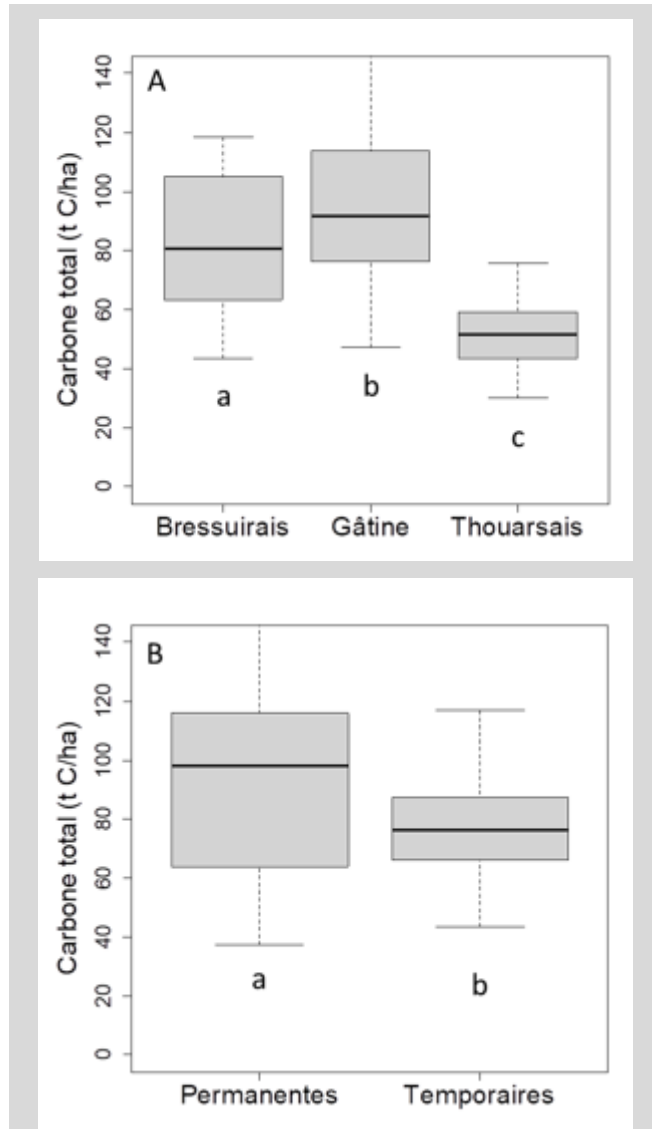


FIGURE 2 : Effet de la zone géographique (A : Gâtine, Bressuirais, Thouarsais) et du type de prairie (B : permanentes, temporaires) sur le stock total de carbone de la couche 0-75 cm (moyenne sur les deux dates de prélèvement). Les boîtes à moustache représentent les valeurs minimales, maximales, les quartiles supérieurs et inférieurs et la médiane (trait gras). Des lettres différentes indiquent que les moyennes diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Figure 2: Effect of geographical area (A: Gâtine, Bressuirais, Thouarsais) and grassland type (B: permanent, temporary) on the total carbon stock of the 0-75 cm layer (average over the two sampling dates).

valeur moyenne de vitesse de stockage sur l'ensemble du profil (0-75 cm) est cohérente avec les données de la littérature qui donnent une fourchette de + 0,5 à + 1,0 t C/ha/an pour des prairies de moins d'une dizaine d'année et sur l'horizon 0-30 cm (Angers *et al.*, 2020 ; Gastal, 2020).

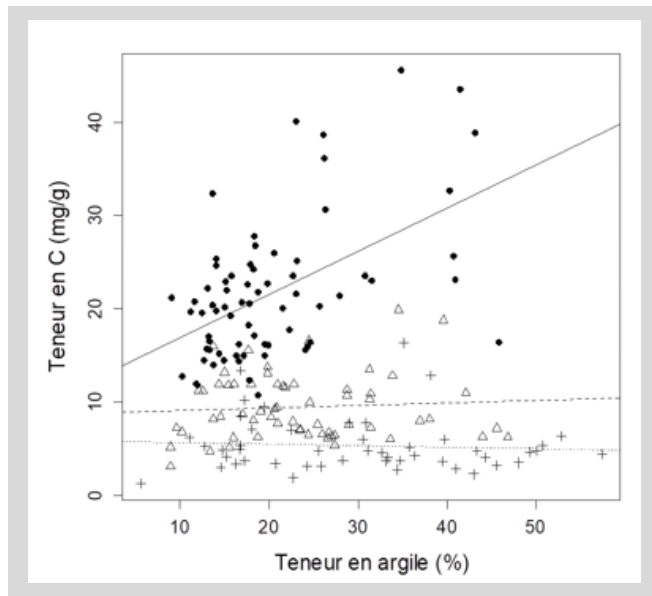


FIGURE 3 : Teneur en carbone (mg C/g de terre fine) en fonction de la teneur en argile (les deux dates de prélèvement confondues) par horizon de sol. Cercles noirs, trait plein : horizon 0-25 cm ; triangles blancs, pointillés : horizon 25-50 cm ; croix, pointillés : horizon 50-75 cm. La corrélation entre les deux variables est positive et significative ($p < 0.05$; $R^2 = 0,27$) pour l'horizon 0-25 cm.

Figure 3: Carbon content (mg C/g fine soil) as a function of clay content (both sampling dates combined) by soil horizon.

Toutefois, cette valeur moyenne de stockage masque une forte variabilité entre prairies. Ainsi, 9 des 35 prairies observées ont perdu du carbone entre les deux dates de prélèvement, alors que la majorité des prairies (26/35) ont augmenté leur stock de carbone.

Plusieurs valeurs extrêmes sont observées. La vitesse de stockage de carbone total (0-75 cm) résulte d'un calcul de différence de quantité, cumulée sur chaque horizon, conduisant à une incertitude sur la différence de C total qui est inévitablement élevée et qui peut expliquer ces quelques valeurs extrêmes.

L'analyse statistique de l'ensemble des données permet néanmoins de mettre en évidence que la vitesse de stockage de C total était en premier lieu dépendante ($p < 0,001$) de la quantité totale (0-75 cm) de carbone initial à la première date de mesure (Tableau 1B ; Figure 4). En second lieu, la vitesse de stockage de C total dépendait d'une interaction entre la quantité totale initiale de carbone (0-75 cm) et la teneur en argile ($p = 0,013$). En revanche aucun effet de la zone géographique (Gâtine, Bressuirais et Thouarsais), du

type de prairie (temporaire, permanente), de la teneur en gravier ni du type de pâturage (PTD, non PTD) n'était significatif. L'absence d'effet de la zone géographique et du type de prairie sur la vitesse de stockage de C total, contraste dans un sens avec leur effet précédemment identifié sur le stock de C total.

Toutefois, stock et vitesse de stockage sont deux variables distinctes qui ne répondent pas nécessairement aux mêmes facteurs. De plus, dans le présent modèle d'analyse de la vitesse de stockage dans lequel la quantité initiale de carbone était considérée comme un facteur, l'effet de la zone géographique et du type de prairie est probablement en partie absorbé par l'effet explicatif de ce facteur quantité initiale de carbone.

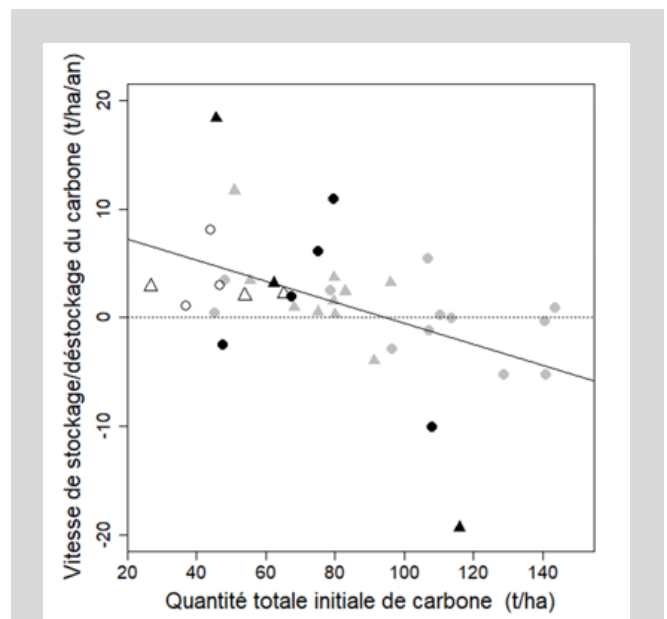


FIGURE 4 : Effet de la quantité initiale de carbone total du sol sur la vitesse de stockage/déstockage de carbone total (0-75 cm). Noir : Bressuirais ; gris : Gâtine ; symboles ouverts : Thouarsais. Triangles : prairies temporaires ; cercles : prairies permanentes. Significativité de la régression : $p < 0,002$.

Figure 4: Effect of initial amount of total soil carbon on the rate of total carbon storage/unstorage (0-75 cm).

La vitesse de stockage de carbone total (0-75 cm) est donc dépendante de la quantité totale initiale de carbone : plus le stock de carbone total du sol est élevé, plus la vitesse de stockage sur l'ensemble du profil est faible (Figure 4), voire négative (« déstockage » de carbone). Cette observation rejoint la conclusion d'études récentes sur prairie (Graux et Klumpp, 2020). Elle rejoint aussi les conclusions tirées pour les rotations prairie-culture, selon lesquelles les rotations mises en place derrière prairie permanente laissent souvent une teneur en carbone élevée conduisant généralement à une perte de carbone, alors qu'inversement les rotations culture-prairie mises en place derrière des successions de cultures établies de

longue date laissent généralement une teneur initiale en carbone du sol plus faible et conduisent à une augmentation de teneur en carbone du sol lors de la phase de prairie (Gastal, 2020). La diminution de la vitesse de stockage de carbone dans le sol avec l'augmentation du stock de carbone est aussi l'une des raisons expliquant le ralentissement de la vitesse de stockage de carbone observé sur prairies anciennes au-delà d'une dizaine d'années, comparativement aux prairies plus jeunes (Six *et al.*, 2002 ; Loiseau et Chevallier, 2002 ; Jones et Donnelly, 2004 ; Vertès *et al.*, 2007 ; Angers *et al.*, 2020).

L'origine des différences de quantité initiale de carbone du sol entre les parcelles de la présente étude n'est pas totalement identifiée. Assurément, ces différences de quantité initiale de carbone du sol entre parcelles sont en partie déterminées par l'âge des prairies, les prairies permanentes ayant en moyenne un stock de carbone plus élevé que les prairies temporaires (*cf.* paragraphe précédent et Figure 2B). Ces différences sont également en partie déterminées par la nature pédologique des sols, notamment leur teneur en argile dont l'effet a été identifié dans l'horizon 0-25 cm (Figure 3). Mais ces différences de quantité initiale de carbone du sol sont sans doute aussi à rechercher dans les conditions de gestion des parcelles antérieures à notre étude. Ces conditions antérieures ne nous sont généralement pas précisément connues. Antérieurement à notre période d'observation, certaines parcelles ont pu être gérées en culture durant quelques années, alors que d'autres étaient gérées en prairies. Parmi les parcelles gérées en prairies, certaines pouvaient être exploitées en fauche dominante alors que d'autres pouvaient être surtout pâturées. Les données de la littérature s'accumulent maintenant pour montrer que le pâturage conduit généralement à un plus grand stockage de carbone dans le sol que la fauche (Senapati *et al.*, 2014; Graux et Klumpp, 2020), notamment du fait du retour direct de la matière organique des déjections des animaux et possiblement aussi du fait d'un plus grand dépôt de matière végétale sénescente au sol.

2.3. Le stockage de carbone peut être plus important en profondeur que dans l'horizon de surface, selon les situations

Les teneurs (non montrées) et les quantités de carbone décroissent des horizons de surface vers les horizons plus profonds du sol (Figure 5).

Ceci est très généralement observé sur la plupart des sols cultivés ou naturels (Balesdent *et al.*, 2021). En revanche, en moyenne sur l'ensemble des prairies observées, les quantités de carbone augmentaient significativement entre le premier et le second prélèvement dans l'horizon 25-50 cm (Figure 5B), traduisant un stockage de carbone dans cet horizon, alors qu'aucune évolution significative n'était observée dans l'horizon 0-25 cm (Figure 5A).

Plus précisément, dans l'horizon 0-25 cm, la moitié des prairies ont accumulé du carbone alors que l'autre moitié en a perdu. Comparativement, 75 % des prairies ont gagné du carbone dans les horizons 25-50 et 50-75 cm alors que seulement 25 % en ont perdu. Dans les horizons 0-25, 25-50 et 50-75 cm, les prairies de notre étude ont montré des vitesses de stockage respectivement de $0,39 \pm 0,56$, $0,91 \pm 0,39$ et $0,26 \pm 0,14$ t C/ha/an en moyenne. Ce résultat contraste avec la majorité des études sur cultures qui indiquent que les variations de carbone se produisent de manière prépondérante dans la couche la plus superficielle du sol, généralement 0-30 cm (Balesdent, 2021).

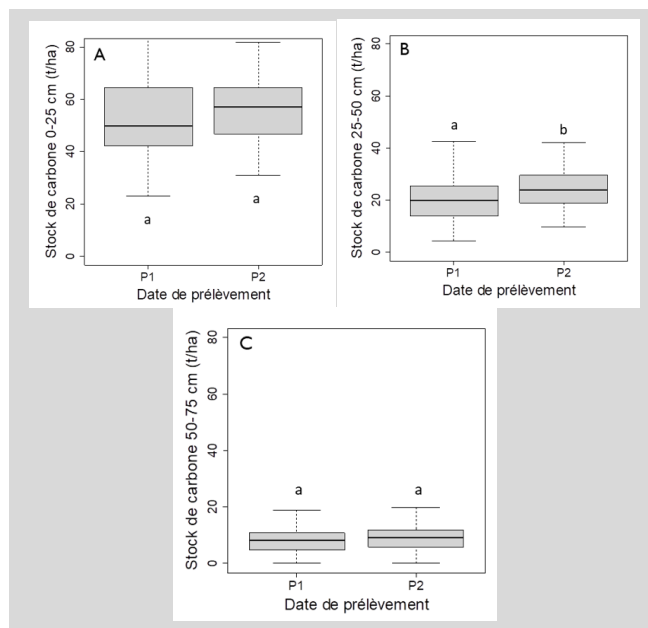


FIGURE 5 : Evolution de la quantité de carbone par horizon avant la mise en place de PTD (T_0) et après 4 années de gestion en PTD, selon l'horizon (A: 0-25 cm).

Les boîtes à moustache représentent les valeurs minimales, maximales, les quartiles supérieurs et inférieurs et la médiane (trait gras). Des lettres différentes indiquent que les moyennes diffèrent significativement au seuil de 5%. Test apparié de Wilcoxon : $p = 0,441$, $0,015$ et $0,079$ respectivement pour les horizons 0-25, 25-50 et 50-75 cm.

Figure 5: Evolution of the quantity of carbon per horizon before the implementation of PTD (T_0) and after 4 years of PTD management, according to the horizon (A: 0-25 cm).

Une analyse plus précise du profil de répartition du stockage de carbone avec la profondeur a pu être faite à partir de l'analyse de nos valeurs de vitesse de stockage par horizon. L'analyse de variance globale, sur l'ensemble des horizons, nous a permis d'identifier un effet significatif des facteurs profondeur de l'horizon et quantité initiale de carbone, sur la vitesse de stockage de carbone (Tableau 2A). L'analyse de variance horizon par horizon (Tableau 2B) permet de préciser que l'effet de la quantité initiale de carbone sur la vitesse de stockage était significatif dans l'horizon 0-25 cm ($p < 0,001$) et l'horizon 25-50 ($p = 0,032$), mais pas dans l'horizon 50-75 cm ($p = 0,291$). Ces résultats sont

illustrés dans la Figure 6, qui montre une relation linéaire négative très significative ($p=0,003$) entre la vitesse de stockage de C et le stock initial de C dans l'horizon 0-25 cm, alors que cette relation est plus faiblement significative dans l'horizon 25-50 ou non significative dans l'horizon 50-75 cm.

A : analyse globale		
Facteur		Significativité
Stock de C de l'horizon	0,001	**
Horizon	0,441	NS
Interaction stock de C x Horizon	<0,001	**

B : analyse par horizon		
Facteur		Significativité
Horizon 0-25	Stock de C de l'horizon	<0,001 ***
Horizon 25-50	Stock de C de l'horizon	0,032 *
Horizon 50-75	Stock de C de l'horizon	0,291 NS

TABEAU 2 : Analyse de variance sur la variable vitesse de stockage de carbone par horizon, avec en co-variable le stock initial par horizon. A : analyse globale sur l'ensemble des horizons. B : analyse horizon par horizon. La significativité est indiquée par la p-value de l'analyse de variance (cf. Matériels et Méthodes).

Table 2: Analysis of variance on the variable carbon storage rate by horizon, with the initial stock by horizon as a co-variable.

La majeure partie des études sur le carbone du sol, ainsi que les inventaires nationaux et internationaux, se limitent souvent à la couche 0-30 cm. Les données observées ici confirment d'autres études et synthèses conduites sur profils de sol plus profonds montrant qu'en prairie, le stockage du carbone en profondeur peut être important à prendre en compte (Rumpel et Kögel-Knabner, 2011). L'importance de l'accumulation de carbone observée dans l'horizon 25-50 cm, en moyenne globale sur l'ensemble des parcelles de notre étude, peut probablement s'expliquer par les spécificités de biomasse, d'activité et de sénescence racinaires relativement plus élevées dans les horizons profonds sous prairies déjà bien installées que sous cultures, et par la plus grande stabilité du carbone dans les horizons profonds que dans l'horizon de surface (Balesdent, 2021). De plus, le retour de matière organique lié aux déjections animales et la plus grande activité biologique de transfert vertical de matière organique de la surface vers la profondeur, liée notamment à la présence et à l'activité plus importante des lombriciens et globalement de l'ensemble des organismes participant à la dégradation et au transfert de matière organique que sous culture, peuvent également contribuer à expliquer cette accumulation de carbone en profondeur.

Il faut aussi souligner que la plus grande stabilité du carbone profond par rapport au carbone de surface (Balesdent, 2021) augmente l'intérêt des prairies et de

leur stockage plus en profondeur, vis-à-vis de la problématique globale de séquestration de carbone dans les sols.

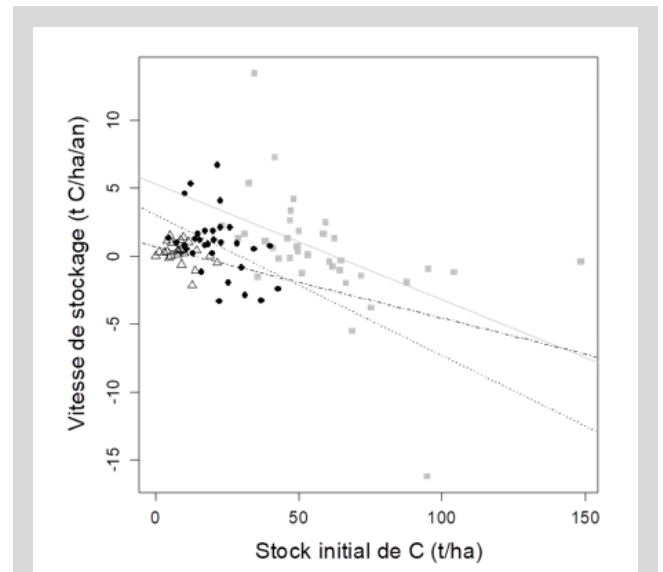


FIGURE 6 : Relation entre la vitesse de stockage/déstockage de carbone par horizon et la quantité initiale de carbone par horizon. Carrés et trait continu gris : horizon 0-25 cm ; cercles et tirets noirs : horizon 25-50 cm ; triangles ouverts et pointillés gris : horizon 50-75 cm. La régression linéaire est significative pour les horizons 0-25 cm ($p<0,003$) et 25-50 cm ($p=0,017$), et non significative pour l'horizon 50-75 cm ($p=0,102$).

Figure 6: Relationship between the rate of carbon storage / release per horizon and the initial quantity of carbon per horizon.

Il n'en reste pas moins que notre observation de stockage en profondeur n'a de valeur que sur l'ensemble du réseau. Regardée prairie par prairie, la vitesse de stockage en surface peut varier et même s'inverser selon les conditions au moment de l'observation, qui dépendent largement des modalités de gestion, anciennes ou récentes, du climat et de la nature des sols des parcelles. Ceci explique probablement la grande diversité des observations de profils de stockage de carbone sous prairie rapportées dans la littérature.

Conclusion

La présente étude apporte des données chiffrées de stock de carbone du sol sur des zones d'élevage assez mal connues des services de cartographie des sols, les zones de bocage du nord des Deux-Sèvres. Elle montre que dans le Bressuirais et la Gâtine, les stocks de carbone du sol sous prairie sont un peu inférieurs à la moyenne nationale sur prairie, et nettement plus faibles dans le Thouarsais. Les faibles valeurs observées dans cette dernière zone peuvent s'expliquer par des sols moins profonds, une teneur en argile plus faible, et par

une productivité végétale moins élevée due à une pluviométrie et une réserve utile des sols plus faibles.

En moyenne sur une profondeur potentielle de 75 cm, les prairies étudiées ont stocké 1,36 t C/ha/an, ce qui est une valeur qui se situe dans le haut de la fourchette des données de la littérature pour les prairies jeunes (Arrouays, 2002 ; Gastal, 2020).

De manière plus particulièrement originale la présente étude montre que :

- la vitesse de stockage total de carbone sur l'ensemble du profil est corrélée négativement à la quantité de carbone initial présent dans le profil à la première date de mesure. Cette quantité de carbone initial, qui dépend probablement de l'historique des sols et de la gestion des prairies, explique une part importante de la variabilité observée de stockage de carbone. Ce résultat est aussi à relier aux observations de la littérature selon lesquelles le stockage de carbone sous prairie est non linéaire et ralentit avec leur âge, voire plafonne après plusieurs dizaines d'années ;
- en moyenne sur l'échantillon étudié de prairies, le stockage de carbone de l'horizon 25-50 cm est le plus important. Cette observation du rôle du carbone profond a été suggérée dans la synthèse de Graux et Klumpp (2020) sur les prairies permanentes, mais n'est pas souvent mise en évidence faute de prélèvements dans les horizons inférieurs à 0-30 cm. Elle est d'autant plus importante à prendre en compte dans les études à venir qu'on sait que le carbone stocké en profondeur est plus stable que le carbone stocké dans l'horizon de surface ;
- Toutefois, l'importance relative de ce stockage profond de carbone sous prairie n'est pas systématique. Le stockage ou le déstockage de carbone de l'horizon de surface (0-30 cm) semblent beaucoup plus variables, dépendant sans doute notamment des gestions antérieures, anciennes ou récentes.

Enfin, si la présente étude met en évidence un stockage important de carbone sur les prairies du réseau et sur la durée d'observation, elle ne permet pas de conclure que ce résultat est dû à la pratique du pâturage tournant dynamique. En effet, le stockage de carbone observé peut s'expliquer uniquement par l'augmentation de l'âge des prairies entre les deux périodes de prélèvement, et aucune différence significative n'a été observée entre les prairies gérées en PTD et celles gérées autrement.

Remerciements : Cette étude a été conduite et financée dans le cadre du projet Européen Life 13 ENV/FR/001315 – Pâturage Tournant Dynamique. Ce projet a en particulier permis le financement ou le co-financement des contrats de travail de Cyril Lemoine, Joséphine Cliquet et Alice Poilane. Les auteurs remercient les agriculteurs qui ont mis à disposition les parcelles du réseau, les conseillers d'élevage de la CAVEB qui ont participé à la réalisation des prélèvements de sol,

et les techniciens de l'INRA qui ont contribué à la préparation des sols et à la réalisation des analyses de carbone.

Article accepté pour publication le 16 septembre 2021

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdalla M., Hastings A., Chadwick D.R., Jones D.L., Evans C.D., Jones M.B., Rees R.M., Smith P., (2018). « Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands ». *Agriculture Ecosystems & Environment*, 253, 62-81.
- Angers D., Augusto L., Bellassen V., Ceschia E., Chenu C., Gastal F., Klumpp K., Martin M., Pellerin S., Thérond O., (2020). « Stocks de carbone des sols métropolitains et effet des changements d'occupation des sols sur l'évolution de ces stocks ». Dans « Stocker du carbone dans les sols Français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », *Expertise Collective*, Rapport scientifique d'étude, INRA (France), 540 p.
- Arrouays D., Deslais W., (1999). « Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? » *Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, 85:6, 278-292.
- Arrouays D., (2002). « Estimations publiées des stocks actuels de carbone dans les sols agricoles français ». Dans « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? », *Expertise Scientifique Collective*. Eds Arrouays D., Balesdent B., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. Pp 69-75.
- Balesdent J., Basile-Doelsch I., (2021). « Les mécanismes à l'origine du stockage/déstockage de C dans les sols ». Dans « Stocker du carbone dans les sols Français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », *Expertise Collective*, Rapport scientifique d'étude, INRA (France), 540 p.
- Bessière A., Bessière M., (2020). « Le pâturage tournant dynamique ». *Edition la France Agricole* 256 p ;
- Blouin *et al.*, (2013). « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services ». *European Journal of Soil Science*, 64, 161-182.
- Byrnes R.C., Eastburn D.J., Tate K.W., Roche L.M., (2018). « A Global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators ». *Journal of Environmental Quality*, 47:4, 758-765.
- Eze S., Palmer S.M., Chapman P.J., (2018). « Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands ». *Geoderma*, 314, 175-183.
- FAO, (2019). « Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems ». *Guidelines for assessment (version 1)*. Rome, FAO, 170 pp.
- Franzluebbers A.J., Stuedemann J.A., Schomberg H.H., Wilkinson S.R., (2000). « Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA ». *Soil Biology and Biochemistry*, 32: 4, 469-478.
- Franzluebbers A.J., Sawchik J., Taboada M.A., (2014). « Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America ». *Agriculture Ecosystems & Environment*, 190, 18-26.
- Gastal F., (2020). « Accroissement de la part des prairies temporaires dans les rotations ». Dans « Stocker du carbone dans les sols Français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? ». *Expertise Collective*, Rapport scientifique d'étude, INRA (France), 540 p.
- Graux A.I., Klumpp K., (2020). « Etat des connaissances sur les pratiques réputées « stockantes » en prairies permanentes ». Dans « Stocker du carbone dans les sols Français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? ». *Expertise Collective*, Rapport scientifique d'étude, INRA (France), 540 p.
- Huyghe C., (2005). « Prairies et cultures fourragères en France: Entre logiques de production et enjeux territoriaux ». *Editions INRA*. 228p.
- Johnston A. E., Poulton P. R., Coleman K., Macdonald A. J., White R. P., (2017). « Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley-arable rotations on a sandy loam soil in England ». *European Journal of Soil Science*, 68, 305-316.
- Jones M.B., Donnelly A., (2004). « Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂ ». *New Phytologist*, 164:3, 423-439.

- Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L., (2011). « Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment ». *Agriculture Ecosystems & Environment*, 141, 184-192.
- Lemaire G., Ryschawy J., de Faccio Carvalho P. C., Gastal F., (2016). « Agricultural intensification and diversity for reconciling production and environment. Role of integrated crop-livestock systems ». Dans: J. Gordon, Herbert H.T. Prins and Geoff R. Squire, *Food production and nature conservation. Conflicts and Solutions*, New York, USA. Pp. 115-132.
- Lemoine C., Surault F., Poilane A., Cliquet J., Gastal F., (2021). « Caractéristiques botaniques, productives et qualitatives de prairies de l'ouest de la France gérées en pâturage tournant dynamique ». *Fourrages*, 246, p. 51-66
- Liu M., Liu G., Wu X., Wang H., Chen L., (2014). « Vegetation traits and soil properties in response to utilization patterns of grassland in Hulun Buir City, Inner Mongolia, China ». *Chinese Geographical Science*, 24 :4, 471-478.
- Loiseau P., Chevallier T., (2002). « Estimations chiffrées par unité de surface du stockage de carbone dans le sol associé aux changements de pratiques agricoles. 3.3.5 Passage culture-> prairies ». Dans « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? », *Expertise Scientifique Collective*. Eds Arrouays D., Balesdent B., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. pp 168-171.
- Mary B., Clivot H., Blaszczyk N., Labreuche J., Ferchaud F., (2020). « Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment ». *Agriculture Ecosystems & Environment*, 299, 106972.
- McSherry M.E., Ritchie M.E., (2013). « Effect of grazing on grassland soil carbon: a global review ». *Global Change Biology*, 19, 1347-1357.
- Poilane A., Cliquet J., Porchet A., (2020). « Le projet pâturage tournant dynamique : de l'idée à la mobilisation ». Dans « Pâturage tournant dynamique méthode Herby® : synthèse des 6 années de projet ». *Actes du séminaire*, Parthenay, 21-22 janvier 2020 (<https://www.life-ptd.com/seminaire-de-cloture/recueil-scientifique-de-synthese/>) pp 20-23.
- Powlson D.S., Stirling C.M., Jat M.L., Gerard B.G., Palm C.A., Sanchez P.A., Cassman K.G., Kenneth G., (2014). « Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation ». *Nature Climate Change*, 4:8, 678-683.
- Rasse D.P., Rumpel C. Dignac M.F., (2005). « Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization ». *Plant and Soil*, 269, 341-356.
- Rumpel C. et Kögel-Knabner I., (2011). « Deep soil organic matter a key but poorly understood component of terrestrial C cycle ». *Plant and Soil*, 338, 143-158.
- Senapati N., Chabbi A., Gastal F., Smith P., Mascher N., Loubet B., Cellier P., Naisse C., (2014). « Net carbon storage measured in a mowed and grazed temperate sown grassland shows potential for carbon sequestration under grazed system ». *Carbon Management*, 5:2, 131-144.
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K., (2002). « Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils ». *Plant and Soil*, 241:2, 155-176.
- Smith P., (2014). « Do grassland act as perpetual sink of carbon? ». *Global Change Biology*, 20, 2708-2711.
- Soussana J.F., Lemaire G., (2014). « Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems ». *Agriculture Ecosystems & Environment*, 190, 9-17.
- Vertès F., Mary B., (2007). « Modelling the long term SOM dynamics in fodder rotations with a variable part of grassland ». *International Symposium on Organic Matter Dynamics in Agro-Ecosystems*, Poitiers (France). pp 549-550.
- Vertès F., Hatch D., Velthof G., Taube F., Laurent F., Loiseau P., Recous S., (2007). « Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. Permanent and temporary grassland: plant, environment and economy ». Proceedings of the 14th Symposium of the European Grassland Federation, de Vliegheer, A.; Carlier, L. Ghent, Belgium, 3-5 September 2007. *Belgian Society for Grassland and Forage Crops*, pp. 227-246.
- Voisin A., (1957). « Productivité de l'herbe ». *Editions France Agricole*, ré-édition 2018, 439 p.
- Zani C.F., Gowing J., Abbott G.D., Taylor J.A., Lopez-Capel E., Cooper J., (2020). « Grazed temporary grass-clover leys in crop rotations can have a positive impact on soil quality under both conventional and organic agricultural systems ». *European Journal of Soil Science*, 1-17.