



HAL
open science

Analyse des performances des couverts végétaux pâturés dans les systèmes d'élevage du Nord-Comminges

Adrien Jouglet

► **To cite this version:**

Adrien Jouglet. Analyse des performances des couverts végétaux pâturés dans les systèmes d'élevage du Nord-Comminges. Agronomie. 2024. hal-04796678

HAL Id: hal-04796678

<https://hal.inrae.fr/hal-04796678v1>

Submitted on 21 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse des performances des couverts végétaux pâturés dans les systèmes d'élevage du Nord-Comminges

Rapport
d'étude

SEPTEMBRE 2024



Etude effectuée par : Adrien Jouglet, étudiant AgroParisTech (PISTv)

Sous l'encadrement de : Lionel Alletto, Directeur de recherche UMR AGIR (Centre INRAE Occitanie-Toulouse)

Enseignant référent : Maude Quinio

RAPPORT DE STAGE

Jouquet Adrien

Dans le cadre du stage de 3^{ème} année

Stage effectué du : 04/03/2024 au 30/08/2024

À : INRAE Occitanie-Toulouse

UMR AGIR – Agroécologie, innovations et territoires

24 Chemin de Borde Rouge - Auzeville

31326 Castanet Tolosan cedex

Sur le thème :

Analyse des performances des couverts végétaux pâturés dans les systèmes d'élevage du Nord-Comminges

Eventuellement, rapport confidentiel : Date d'expiration de confidentialité :

Enseignant tuteur : Maude Quinio

Maître de stage : Lionel Alletto

Table des matières

Table des figures.....	5
Table des tableaux.....	5
Table des annexes.....	6
Remerciements.....	6
Abréviations utilisées	7
Introduction.....	1
1. Les cultures intermédiaires : état des connaissances de leurs effets et contexte d'utilisation.....	3
1.1. Les cultures intermédiaires comme levier de la transition agroécologique.....	3
1.2. Choix des espèces de cultures intermédiaires et valorisation alimentaire	4
1.2.1. Les besoins alimentaires des bovins.....	5
1.2.2. Les caractéristiques alimentaires des familles botaniques principalement implantées en couverts	5
1.3. Influence du pâturage de cultures intermédiaires sur le sol.....	6
1.3.1. Influence du pâturage de couverts sur la compaction du sol.....	6
1.3.2. Influence du pâturage de couverts sur la stabilité structurale du sol	6
1.3.3. Influence du pâturage de couverts sur l'activité biologique du sol.....	7
1.3.4. Influence du pâturage de couverts sur le cycle des éléments.....	8
1.4. Influence du pâturage de couverts sur la culture suivante	9
1.5. Problématique et hypothèses de l'étude	10
1.6. Projet de recherche et zone d'étude	11
1.6.1. Le projet COTERRA : Repenser les collectifs agricoles dans leurs territoires pour plus d'autonomie	11
1.6.2. Le territoire d'étude du Nord-Comminges	11
2. Analyser les performances de couverts pâturés : Matériels et méthodes.....	13
2.1. Sites expérimentaux	13
2.2. Design expérimental.....	15
2.3. Mesures effectuées	16
2.3.1. Mesures sur les plantes	16
2.3.2. Mesures sur le sol.....	17
2.4. Calcul des niveaux de performances des services écosystémiques	19
2.5. Analyse statistique.....	20
3. Résultats	21
3.1. Analyse de la ressource fourragère produite par les couverts.....	21

3.1.1.	Biomasse produite par les couverts	21
3.1.2.	Valeur alimentaire des couverts	22
3.1.3.	Acquisition d'éléments par les couverts.....	23
3.1.4.	Décomposition des résidus des couverts	26
3.2.	Analyse de l'influence du pâturage sur le sol	27
3.2.1.	Influence du pâturage sur la fertilité physique du sol	27
3.2.2.	Influence du pâturage sur la fertilité biologique du sol.....	30
3.3.	Analyse globale des niveaux de performance des couverts pâturés	31
4.	Discussion.....	33
4.1.	Quelques limites et recommandations sur l'acquisition des données et les calculs des indicateurs	33
4.1.1.	Biomasses de couverts	33
4.1.2.	Valeur alimentaire	33
4.1.3.	Acquisition et minéralisation des éléments	34
4.1.4.	Compaction et structure du sol	35
4.1.5.	Fertilité biologique	37
4.1.6.	Analyse globale des couverts et perspectives	38
4.2.	Observations et ressentis des collaborateurs.....	39
5.	Conclusion	41
	Bibliographie.....	42
	Sitographie.....	47
	Annexes	49
	Abstract	58
	Résumé.....	59

Table des figures

Figure 1 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Palaminy sur la période 2002-2022	13
Figure 2 : Texture du sol des différents blocs (n° 1 à 5) des 3 horizons des 2 sites expérimentaux sur le triangle des textures de l'USDA.....	14
Figure 3 : Biomasse aérienne sèche par modalité au cours du temps sur les deux sites. Les intervalles de confiance sur la biomasse totale de la modalité sont représentés. Les lettres représentent les tests de Tukey sur l'effet de la campagne au sein des modalités.....	22
Figure 4 : Carbone acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés.....	24
Figure 5 : Relation entre l'azote acquis par le couvert en sortie d'hiver et les reliquats azotés au semis	25
Figure 6 : Azote acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés.....	25
Figure 7 : Soufre acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés.....	26
Figure 8 : Dynamique de minéralisation de l'azote des résidus des couvert selon les modalités et les sites.....	27
Figure 9 : Porosité du sol à 5 et 15 cm de profondeur en fonction des modalités, des campagnes de prélèvement et des sites expérimentaux	28
Figure 10 : Evolution de la note structurale du test VESS sur l'essai B.....	29
Figure 11: Diagramme de la pression nécessaire à la pénétration en fonction de la profondeur sur l'essai A. Les intervalles de confiance sont représentés.....	30
Figure 12 : Graphique radar des niveaux de performance des modalités sur les deux essais.....	32

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du sol des essais sur 3 horizons.....	14
Tableau 2 : Espèces et densités de semis des différentes modalités	15
Tableau 3: Fonctions écosystémiques et indicateurs utilisés dans le cadre de l'analyse multifonction	20
Tableau 4: Valeurs alimentaires des couverts en fonction des modalités et des sites expérimentaux. Les intervalles de confiance sont présentés (ic). Les lettres représentent les résultats des tests de Tukey par variable.....	23
Tableau 5: Temps de pâturage théorique par hectare selon la part de biomasse aérienne consommée par le troupeau (100%, 75%, 50%). Les intervalles de confiance sont représentés (ic).....	23
Tableau 6: Carbone oxydable (POXC) en mgC/kg sol et respiration basale (Respi) en mgC-CO2/kg sol/j selon les modalités, les campagnes (av : avant pâturage ; ap : après pâturage) et les essais. Les intervalles de confiance (ic) et tests de Tukey sont présentés	31
Tableau 7: Nombres de points de mesure par classe d'effectifs de vers de terre et par modalités sur l'essai A avant pâturage.....	31

Table des annexes

Annexe A : Calendrier des essais	49
Annexe B : Plans des essais	49
Annexe C : Equations utilisées pour calculer la valeur alimentaire, d'après (Alimentation des ruminants, INRAE, 2018)	50
Annexe D : Grilles de notation du test bêche issues de (Guide méthodique du test bêche Structure et action des vers de terre, 2018).....	53
Annexe E : Essai A avant pâturage.....	56
Annexe F : Pâturage sur l'essai A	56
Annexe G : Colza pâturé sur l'essai A.....	57
Annexe H : Prototype d'automatisation du Slake test.....	57

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce stage et à la rédaction de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie mon maître de stage Lionel Alletto pour sa disponibilité, son partage de connaissances, son implication et ses précieux conseils que ce soit pour la rédaction de ce mémoire mais aussi pour mon orientation.

Je remercie particulièrement Eric Deboeuf, Jean-Baptiste Ariès et Benoît Ferrère pour avoir accepté d'accueillir les expérimentations sur leurs parcelles et avoir pris des risques pour expérimenter le pâturage de couverts.

Je remercie toute l'équipe technique qui a grandement participé aux relevés des données : Sophie Ducos-Boue, Noémie Deschamps, Franck Pages, Lucas Boutet, Sophie Teychene, Eric Lecloux, Benoît Gleizes, Damien Marchand. Merci pour l'accueil, pour le partage de connaissances et pour votre disponibilité malgré les conditions météo difficile.

Je remercie également toutes les personnes qui se sont rendues disponibles ponctuellement pour nous aider dans les périodes de terrain chargées : Julia Cheyrou, Pierre Rodinet, Hadrien Pham, Manon Pull, Fanny Raoux, Caroline Mouille, Celia Medan, Dorian Bourgeois. Merci également pour les échanges enrichissants sur vos projets respectifs.

Merci à Caroline Mouille et Floriane Clement-Kumar pour les conseils toujours constructifs et l'aide sur l'aspect diffusion des résultats notamment.

Merci à mes camarades de bureau Julia Cheyrou et Pierre Rodinet ainsi qu'à tous les stagiaires des unités AGIR et DYNAFOR pour votre bonne humeur et les parties de volleyball endiablées.

Enfin, merci à Maude Quinio pour son suivi tout au long du stage, ses relectures et ses conseils pour la rédaction de ce mémoire.

Abréviations utilisées

ACS : agriculture de conservation des sols
ANOVA : analyse de la variance
AP : après pâturage
AV : avant pâturage
BPR : balance protéique ruminale
C : carbone
CI : culture intermédiaire
CIMS : culture intermédiaire multi-services
CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrates
Ic : intervalle de confiance
MS : matière sèche
N : azote
PANDI : protéines alimentaires non digestibles dans l'intestin
POXC : permanganate oxidizable carbon
PDI : protéines digestibles dans l'intestin
Respi : respiration basale
S : soufre
SD : standard deviation
SOC : carbone organique du sol
SYGESAVE : Syndicat de gestion de la Save et de ses affluents
TAE : Transition agroécologique
TCS : Techniques culturales simplifiées
UF : unité fourragère
UFL : unité fourragère laitière
UFV : unité fourragère viande
VA : vache allaitante
VESS : visual evaluation of soil structure
VL : vache laitière

Introduction

Le changement climatique a des effets sur l'agriculture au sens large comme l'avancement de la date des moissons ou des canicules marquées par exemple. L'agriculture actuelle subit ces variations climatiques et des cultures comme la vigne ne sont plus adaptées dans certaines régions. A l'opposée, des cultures comme le soja, le grenadier se développent en métropole en lien avec l'évolution du climat. Les systèmes de grandes cultures en régime pluvial sont fragilisés et doivent adapter leurs pratiques pour être plus résilients dans ce contexte. En effet, l'imprévisibilité des phénomènes météorologiques fragilise économiquement les exploitations avec des récoltes variables dans un contexte de marché mondialisé où les variations de prix sont aussi importantes puisque dépendants des récoltes d'autres régions du monde. Réciproquement, l'agriculture est un domaine émetteur de gaz à effet de serre qui amplifient le réchauffement climatique actuel. Il y a donc une nécessité de changer le système de production majoritaire en place. L'agroécologie propose des pratiques alternatives dans l'objectif de réduire l'impact environnemental de l'agriculture et de rendre les exploitations plus résilientes face au changement climatique. La transition agroécologique est « un changement de modèle agricole pour mettre en œuvre les principes de l'agroécologie et répondre ainsi aux crises que traverse ce secteur » (Hazard *et al.*, 2017).

Les exploitations avec un atelier d'élevage sont aujourd'hui parmi les plus fragilisées en France ce qui se traduit par une baisse du cheptel bovin national depuis 7 ans (Agreste, 2023). Une des conséquences du changement climatique est une diminution du stock fourrager disponible pour les éleveur.euse.s pendant les années sèches. Les besoins alimentaires des animaux étant presque constants sur l'année, il faut amortir les variations des récoltes fourragères. Les éleveur.euse.s doivent donc trouver d'autres sources de fourrage, pendant la période hivernale notamment. Cette problématique de l'autonomie fourragère à l'échelle nationale est régulièrement mise en avant dans les débats ; et des questions politiques, économiques en lien avec l'achat de fourrages viennent se greffer aux questions agronomiques.

Par ailleurs, le système agricole conventionnel et majoritaire français est de plus en plus critiqué pour ses impacts environnementaux : utilisation des produits phytosanitaires, émissions de gaz à effet de serre, diminution de la biodiversité. En production végétale, des pratiques agronomiques à moindre impact environnemental se développent. Les cultures intermédiaires représentent un levier important dans ce contexte économique, environnementale et climatique que nous avons décrit. Les cultures intermédiaires sont des cultures semées et le plus souvent non récoltées, donc peu voire pas valorisées directement économiquement, mais des services sont recherchés tels que des services de régulation ou de soutien (Justes & Richard, 2017). L'insertion de cultures intermédiaires durant les périodes d'interculture peut durer de quelques semaines à 9 mois entre deux cultures de rente. De plus, la directive nitrates de 2012 oblige l'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates dans les zones vulnérables à la pollution de l'eau. Cependant, les cultures intermédiaires ne se limitent pas à un rôle de piège à nitrates. D'autres fonctions écosystémiques telles que la réduction de l'érosion, le stockage de carbone, la fixation d'azote atmosphérique, la régulation des bioagresseurs peuvent être recherchées par les agriculteur.ice.s et on parle aujourd'hui de cultures intermédiaires multi-services (Justes & Richard, 2017).

Cependant en 2017, le constat est qu'environ 25% de la surface de grandes cultures est gérée avec les repousses du précédent et 20 % par des cultures intermédiaires. Environ 15% des surfaces est en interculture longue avec un sol nu, ce qui s'explique par les dérogations à l'obligation de couvrir le sol en interculture longue (Ballot, 2022). Il y a donc des surfaces importantes qui peuvent potentiellement être semées en cultures intermédiaires mais qui sont aujourd'hui gérées autrement. Le coût d'implantation de la culture intermédiaire est un frein à leur implantation surtout en période sèche où la levée n'est pas garantie.

Une valorisation économique comme la production de fourrage pour un troupeau pourrait inciter les agriculteur.ice.s à davantage implanter ces cultures intermédiaires. Le pâturage des cultures intermédiaire apparaît comme une solution intéressante pour les exploitations en polyculture-élevage. En effet, le pâturage ne nécessite pas de travail de récolte, de transport, de stockage et il permet de détruire la culture intermédiaire en même temps. Cependant, le chargement de la parcelle et la durée de pâturage sont à contrôler pour éviter des phénomènes de surpâturage.

L'objectif de cette étude est d'étudier les niveaux de services et de disservices éventuels rendus par différents mélanges d'espèces en interculture longue lorsqu'ils sont pâturés par des bovins. Nous allons mener cette étude sur le territoire du Nord-Comminges dans la région Occitanie, un territoire de polyculture-élevage qui subit des phénomènes d'érosion. Ce mémoire est structuré avec une première partie qui fera l'état des connaissances sur les couverts végétaux et leur pâturage. Une deuxième partie présentera la stratégie et les dispositifs expérimentaux mis en place pour répondre aux questions de cette étude. Une troisième partie présentera les résultats de ces dispositifs expérimentaux. Une quatrième partie discutera le protocole utilisé ainsi que les résultats obtenus et une conclusion résumera les principaux résultats de cette étude.

1. Les cultures intermédiaires : état des connaissances de leurs effets et contexte d'utilisation

1.1. Les cultures intermédiaires comme levier de la transition agroécologique

Les prises de conscience récentes des impacts de l'agriculture de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle sur l'environnement et la santé mènent à des évolutions du système agricole. Le retrait de substances actives du marché des produits phytosanitaires par l'ANSES depuis 2015 en est un exemple. La transition agroécologique est aujourd'hui un enjeu important du monde agricole et des politiques agricoles (Arnauld de Sartre *et al.*, 2019). En effet, de nombreuses problématiques montrent aujourd'hui les limites du modèle agricole conventionnel. La diminution du taux de matière organique des sols et donc le déstockage de carbone (Pellerin *et al.*, 2020), la dépendance aux engrais de synthèses et aux produits phytosanitaires (Hu, 2020) en sont des exemples. D'après Hazard *et al.* (2017), la transition agroécologique est un changement du modèle agricole pour mettre en œuvre les principes de l'agroécologie et répondre aux crises. L'agroécologie s'appuie donc sur les processus écologiques des écosystèmes et agroécosystèmes

Cette transition est encouragée par les politiques françaises et repose sur une performance économique, sociale, environnementale et sanitaire des exploitations (*Article L1 - Code rural et de la pêche maritime*).

Dans ce contexte, l'implantation de cultures intermédiaires sur les parcelles est un levier qui peut améliorer les performances environnementales principalement mais aussi économique et sanitaire.

L'implantation de cultures intermédiaires notamment en interculture longue fournit une diversité de fonctions écosystémiques qui réduit l'impact environnemental de l'agriculture. L'interculture longue est un intervalle de temps de plusieurs mois (jusqu'à 8-9 mois) qui s'étale de la récolte d'une culture d'hiver généralement, au semis d'une culture de printemps l'année suivante. On parle ainsi de CIMS pour cultures intermédiaires multi services (Justes & Richard, 2017). Les fonctions écosystémiques recherchées peuvent être par exemple la fixation d'azote atmosphérique, le stockage de carbone, la production de fourrage, le contrôle des adventices...(Lamichhane & Alletto, 2022). Ces fonctions écosystémiques s'appuient sur des processus biologiques tels que la compétition pour la lumière des végétaux ou la symbiose entre les bactéries du genre *Rhizobium* et les Fabacées. L'agroécologie s'appuie sur ces processus biologiques et en ce sens, l'implantation de CIMS apparaît comme une pratique intéressante pour la transition agroécologique (Claveirole, 2016). Pour autant, l'utilisation des CIMS sur le territoire français reste faible mais elle se développe en lien avec les incitations politiques dans le modèle conventionnel (directive nitrate de 2012, verdissement de la PAC). Le développement de l'agriculture de conservation des sols s'appuie en partie sur l'utilisation de CIMS qui permet de couvrir le sol (un des grands principes de l'ACS). Ce modèle reste minoritaire à l'échelle nationale mais suscite de plus en plus d'intérêt dans le cadre décrit précédemment. La part des surfaces de grandes cultures gérées avec des cultures intermédiaires augmente régulièrement depuis 2001 pour atteindre environ 20% en 2017 et la part de cette surface implantée avec un mélange augmente également (Ballot, 2022).

1.2. Choix des espèces de cultures intermédiaires et valorisation alimentaire

Les cultures intermédiaires peuvent être mono ou plurispécifiques. Les couverts plurispécifiques sont variés et le choix des espèces à planter dépend des objectifs de l'agriculteur notamment. L'association Brassicacées-Fabacées permet d'améliorer le niveau global de services rendus par rapport à une monoculture de l'une ou l'autre (Couedel *et al.*, 2018). Les services considérés dans l'étude de Couedel *et al.* sont les services liés à l'azote (fixation, effet piège à nitrate). Cependant, du fait de leur physiologie, les familles botaniques voire les espèces végétales n'ont pas les mêmes niveaux de services. L'article de Chapagain *et al.* (2020) évalue les services rendus pour quelques espèces couramment utilisées et propose des critères pour choisir un mélange approprié à la parcelle et aux services attendus. Les couverts multi spécifiques améliorent la durabilité du système dans son ensemble mais en s'intéressant à certaines fonctions, le choix de l'espèce est important. Par exemple, les Brassicacées ne sont pas intégrées dans le mélange optimal qui maximiserait les fonctions écosystémiques considérées dans la modélisation de l'étude de Garba *et al.* (2024). En effet, 14 fonctions écosystémiques sont considérées dans cette étude et l'association avoine-légumineuse maximiserait les services écosystémiques.

Malgré les fonctions écosystémiques rendus par les CIMS, nous avons vu dans la partie précédente que l'utilisation des CIMS n'est pas généralisée sur le territoire métropolitain. Cela peut s'expliquer en partie par le coût d'implantation du couvert. En effet le coût de la semence du mélange est assez élevé (40 à 50€ HT/ha d'après les chambres d'agriculture d'Auvergne-Rhône-Alpes, 2021) et l'implantation d'un couvert de trèfle pur au Kansas coûterait entre 97 et 132€/ha environ d'après Bergtold *et al.* (2019). Il est difficile d'estimer l'équilibre réel coût-bénéfice du couvert car beaucoup de paramètres varient. Cependant, Zhou *et al.* (2017) ont analysé la rentabilité de l'implantation de couverts dans un système cotonnier aux Etats-Unis. Ils ont analysé les rendements de coton dans 4 modalités d'interculture : pas de couvert, vesce velue, trèfle incarnat et blé et dans un système labouré et un système non labouré. En incluant dans le calcul économique le prix du fertilisant azoté avec différentes valeurs de l'unité d'azote et l'azote économisé par les couverts, il en ressort que le système sans couverts est plus rentable que le système avec couvert sur toute la gamme de prix de l'unité de l'azote étudiée. Le système sans labour est déficitaire de 91 à 152\$.ha⁻¹ selon la valeur de l'azote en moyenne sur les 29 années de données analysées. Le prix des semences et le coût d'implantation n'ont pas été compensés par l'azote apporté au sol par les couverts de Fabacées.

Nous avons vu dans la partie précédente que les couverts fournissent des services écosystémiques qui ne sont pas directement quantifiables économiquement par les agriculteurs comme le contrôle des adventices, le stockage de carbone ou la limitation de l'érosion. Ces fonctions écosystémiques sont des bénéfices indirects et moins perceptibles que la production de fourrage pour les exploitants (Bergtold *et al.*, 2019). Dans l'optique de promouvoir l'utilisation des CIMS et *in fine* la TAE, il serait donc intéressant de mettre en avant la valorisation fourragère des couverts. Ce service écosystémique serait un proxy qui inciterait les agriculteurs à introduire les CIMS sur leurs exploitations car le bénéfice est rapidement et facilement visible. Les autres services écosystémiques associés moins facilement perceptibles seraient donc rendus également.

En interculture longue c'est-à-dire avec un semis au mois de septembre et une destruction au printemps, les couverts peuvent produire une biomasse de 4.2 t MS/ha en moyenne mais avec une très

forte variabilité (Ruis *et al.*, 2019). Dans cette même revue de la littérature qui analyse une grande variété de types de couverts, la biomasse des couverts dans un système monoculture de maïs varie : 0.5 t MS/ha pour une culture intermédiaire de sarrasin, 4.4 t MS/ha pour une culture intermédiaire à deux espèces. L'écart-type pour la culture intermédiaire à deux espèces est de 2.5 t MS/ha et cette valeur repose sur 84 études. Cette variation peut s'expliquer par le fait que de nombreux paramètres influent sur la production de biomasse comme la parcelle, le système de culture, les conditions climatiques (Ruis *et al.*, 2019). Malgré tout, les cultures intermédiaires représentent un stock fourrager potentiellement conséquent pour les agriculteurs, d'autant plus qu'en sortie d'hiver les ressources fourragères sont limitées dans les exploitations.

Les biomasses produites peuvent être considérables mais l'appétence de la culture intermédiaire et sa valeur alimentaire doivent être suffisantes pour une valorisation en alimentation animale.

1.2.1. Les besoins alimentaires des bovins

Les besoins alimentaires des bovins varient selon le type de production (allaitant ou laitier), la conduite du troupeau et l'âge des animaux essentiellement. L'énergie (en UFL ou UFV : Unité fourragère lait ou viande) et l'azote (en PDI : protéine digestible dans l'intestin) sont les principales caractéristiques étudiées pour ajuster une ration aux besoins. D'après l'Idel qui résume les évolutions du livre L'Alimentation des ruminants (INRAE, 2018) ; les besoins énergétiques d'entretien des vaches au pâturage sont de 7.6 UFL/j. A cela s'ajoutent 0.42 UFL/kg de lait. La valeur alimentaire des aliments va dépendre de leur richesse en matière azotée et de leur digestibilité majoritairement. Les besoins protéiques sont exprimés en PDI et sont aussi dépendants de la conduite du troupeau et de la richesse en PDI de la ration. Les besoins d'entretien d'une vache à l'entrave sont de 612 g de PDI/VL/j. A cela s'ajoute 48 g de PDI/kg lait pour une ration a une concentration de 100 g PDI/kg MS.

1.2.2. Les caractéristiques alimentaires des familles botaniques principalement implantées en couverts

Les Brassicacées comme le colza sont réputées pour leur croissance rapide et donc leur production de biomasse conséquente. Les tissus aériens des espèces de cette famille sont hautement digestibles (digestibilité apparente de la matière sèche : 665, 809, 819, 890 g/kg pour le raygrass, le colza fourrager, le chou fourrager et le navet fourrager respectivement) (Sun *et al.*, 2012) et très énergétiques (0.96 UFL/kg de MS pour un colza dérobé feuillu et 0.94 UFL/kg de MS pour une prairie permanente normande au stade début épiaison) (L'Alimentation des ruminants, INRAE, 2018). Cependant, les Brassicacées contiennent des métabolites secondaires comme les glucosinolates qui peuvent avoir un effet négatif sur la croissance des animaux en réduisant leur consommation de fourrage (Barry, 2013). Il peut donc être pertinent d'utiliser les Brassicacées comme complément du fourrage. Barry (2013) a montré que l'utilisation en complément de chou ou navet fourrager (20 à 30 % de la MS ingérée) était mieux valorisée en production laitière que le sorgho. La production laitière en été lorsque le pâturage de prairies est complété par du navet fourrager ou de l'orge est similaire. Cette étude suggère donc que la consommation de Brassicacées dans un couvert plurispécifique est une option pertinente.

Par ailleurs, la teneur en nitrate des Brassicacées et de la phacélie peut être élevée. Or, les nitrates dans la ration peuvent engendrer des intoxications (ANSES, 2014). Cela renforce l'intérêt d'un fourrage plurispécifique.

Les Fabacées sont quant à elles une source d'azote dans une ration alimentaire. En effet, elles présentent des taux de matière azotée élevées comparativement aux Poacées et dans un mélange Poacées- Fabacées, les ruminants consomment préférentiellement les Fabacées (Phelan *et al.*, 2015).

Les Poacées sont sources de fibre qui est un composant essentiel dans la ration des ruminants (Lee, 2018). Ces fibres sont essentielles pour stimuler la rumination et avoir un apport énergétique étalé dans le temps. Les Poacées sont par ailleurs plus résistantes au pâturage et repoussent facilement du fait de leur capacité de tallage.

Le pâturage de couverts plurispécifiques peut donc constituer une ration assez équilibrée pour les ruminants. Cependant, les conséquences du pâturage sur les autres fonctions écosystémiques que la production de fourrage sont aussi à prendre en compte dans une approche multi-services.

1.3. Influence du pâturage de cultures intermédiaires sur le sol

1.3.1. Influence du pâturage de couverts sur la compaction du sol

Les couverts végétaux sont souvent mis en avant comme un levier pour décompacter et structurer le sol dans des systèmes qui n'ont pas ou peu recours au travail mécanique. Les couverts permettent de diminuer la densité apparente du sol et la résistance du sol par leur système racinaire. Cependant, cet effet est dépendant des espèces implantées et l'effet de décompaction n'est pas toujours observé (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). L'implantation des couverts en agriculture de conservation des sols (ou en TCS) est fréquente et la porosité créée par les racines permet à la culture suivante de développer plus facilement son système racinaire. Son développement est donc meilleur en cas de conditions climatiques difficiles (G. Chen & Weil, 2011; Williams & Weil, 2004). Les couverts végétaux peuvent donc avoir un effet de décompaction du sol par leur système racinaire.

Le pâturage, quant à lui, peut avoir un effet de compaction quand il est pratiqué en conditions humides (Schomberg *et al.*, 2014). Cependant, le tassement du sol par le pâturage est généralement limité en intensité et en profondeur et n'influence pas le rendement de la culture suivante (Bell *et al.*, 2011). Quand il est pratiqué dans des conditions relativement sèche ou avec un faible chargement, le pâturage n'a pas d'effet sur la compaction du sol (Anderson *et al.*, 2022). Une revue de la littérature de Blanco-Canqui *et al.* (2023) montre que 54% des études menées sur le pâturage des couverts concluent à une augmentation de la densité apparente ou de la résistance à la pénétration du sol en surface c'est-à-dire à un phénomène de compaction. Les autres études prises en compte dans cette revue de la littérature n'observent pas de changement significatif sur la densité du sol. Nous pouvons faire l'hypothèse que le chargement, la durée de pâturage et la masse des animaux qui pâturent influent également fortement sur la compaction du sol. Les études citées ont été réalisées avec divers troupeaux : moutons, veaux, génisses.

1.3.2. Influence du pâturage de couverts sur la stabilité structurale du sol

La stabilité structurale du sol est un indicateur de la sensibilité d'un sol à l'érosion. Une faible stabilité structurale peut entraîner une perte de matière par érosion hydrique ou éolienne. Le pâturage de prairies permanentes peut dégrader la stabilité structurale des sols et donc rendre des sols plus

sensibles à l'érosion (Zhang *et al.*, 2022). Le pâturage continu des prairies a un effet négatif donc nous pouvons nous demander s'il y a un effet similaire avec un temps de pâturage plus court sur les cultures intermédiaires.

De leur côté, les cultures intermédiaires augmentent la stabilité structurale des agrégats humides du sol dans 51% des études et n'a pas d'effet dans les autres cas (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Les cultures intermédiaires n'ont pas d'effet sur la stabilité structurales des agrégats secs (Blanco-Canqui *et al.*, 2022; Blanco-Canqui & Ruis, 2020). L'indice de stabilité des agrégats est par ailleurs amélioré avec les cultures intermédiaires dans plus de 80% des parcelles d'après une revue systématique de Hao *et al.* (2023).

Les effets du pâturage de couverts sur la stabilité structurale sont peu étudiés. Une étude de Anderson *et al.* (2022) montre qu'il n'y a pas de différence de stabilité structurale entre un couvert pâturé et un couvert non pâturé à faible chargement (moins de 5 bœufs/ha) et sur plusieurs semaines. Kelly *et al.* (2021) arrivent aux mêmes conclusions avec un troupeau de bovins pâturant en moyenne 28 jours les parcelles d'un couvert plurispécifique contenant notamment des Poacées, Brassicacées et Fabacées.

1.3.3. Influence du pâturage de couverts sur l'activité biologique du sol

L'activité biologique du sol est un indicateur de la santé des sols. Elle peut être estimée via la respiration des microorganismes et la mesure du carbone oxydable au permanganate (POXC). Les couverts végétaux n'ont pas d'effet ou un effet positif sur la concentration en POXC. De plus, la teneur en carbone organique du sol (SOC) est positivement corrélée au POXC donc les couverts peuvent permettre d'améliorer la santé de certains types de sol (Decker *et al.*, 2022). La quantité de carbone de la biomasse microbienne du sol augmente avec les couverts végétaux d'après une revue systématique de Hao *et al.* (2023). Ces effets sur les communautés microbiennes sont à moduler en fonctions des espèces implantées. En effet, par exemple les Brassicacées sont des plantes qui ne mycorhizent pas contrairement à de nombreuses autres familles botaniques comme les Fabacées ou les Poacées (Jane Barker *et al.*, 1998). Plus finement, certaines espèces semées dans les couverts sont associées préférentiellement à certaines communautés microbiennes d'après Finney *et al.* (2017). Dans cette étude, l'avoine et le seigle permettent d'augmenter spécifiquement la communauté de champignons mycorhiziens arbusculaires. La quantité totale de micro-organismes du sol est corrélée positivement à la biomasse aérienne du couvert.

Le pâturage de couverts augmente la fraction de carbone biologiquement active dans les premiers centimètres du sol. Cette augmentation reste faible et le pâturage n'a pas d'influence sur la fraction d'azote biologiquement active (Franzluebbbers & Stuedemann, 2015). Une revue de la littérature de Blanco-Canqui *et al.* (2023) montre que les études disponibles sur ce sujet sont peu nombreuses (5) et leurs résultats sont variables. En effet, une étude montre un effet négatif du pâturage de cultures intermédiaires d'été sur le carbone présent dans la biomasse microbienne des 3 premiers centimètres du sol (1019 mg.kg⁻¹ sur la modalité pâturée et 1176 mg.kg⁻¹ sur la modalité non pâturée) mais ne montre pas d'effet sur cultures intermédiaires d'hiver. Les autres études ne montrent pas d'effet ou une augmentation de la biomasse microbienne du sol.

Les vers de terre étant des espèces architectes des sols, leur présence est un indicateur de la qualité des sols. Bertrand *et al.* (2015) ont montré que les vers de terre sont bénéfiques pour la fertilité des sols notamment en minéralisant la matière organique, en créant de nombreuses galeries qui permettent l'infiltration de l'eau et la pénétration de l'air dans le sol. Cette étude de 2015 montre que l'apport de fumier ou lisier permet d'augmenter le nombre de vers de terre. L'influence du pâturage sur les vers de terre est peu étudiée.

1.3.4. Influence du pâturage de couverts sur le cycle des éléments

Le cycle du carbone et de l'azote sont des sujets qui suscitent de plus en plus d'intérêt ces dernières années en lien avec le réchauffement climatique et la pollution (Udara Wilhelm Abeydeera *et al.*, 2019; Zhi *et al.*, 2015). Le stockage de carbone dans le sol, l'acquisition d'azote et la limitation des fuites d'azote par lixiviation (effet piège à nitrate) sont trois fonctions écosystémiques souvent recherchées lors de l'implantation de couverts en interculture longue (Lamichhane & Alletto, 2022).

1.3.4.1. Influence du pâturage de couverts sur le stockage du carbone dans le sol

Le stockage de carbone dans le sol par l'agriculture et notamment les couverts végétaux suscite beaucoup d'enthousiasme. Cependant, la capacité de stockage de carbone dans les sols par l'implantation de couverts est en réalité limitée dans les pratiques actuelles. Seulement 22 études sur 77 aux Etats-Unis montrent une augmentation du taux de carbone organique dans les sols (SOC) grâce à l'implantation de couverts. Cette augmentation dépend beaucoup du taux de carbone organique initial de la parcelle (Blanco-Canqui, 2022). D'autres études plus larges (372 sites étudiés) montrent par ailleurs que le SOC est significativement plus important dans les parcelles menées avec des couverts végétaux (Abdalla *et al.*, 2019). Le pâturage de couvert ne semble pas avoir d'effet sur le taux de carbone organique d'après une revue de littérature de Blanco-Canqui *et al.* (2023). Cependant, la pression de pâturage semble être un facteur important et nous pouvons faire l'hypothèse qu'une forte pression de pâturage exporte du carbone de la parcelle et donc diminue le taux de carbone dans le sol (Assmann *et al.*, 2014). Finalement, les études produites sur le pâturage de couverts montrent peu d'effets sur le stockage de carbone et ces études méritent d'être poursuivies pour analyser les tendances à plus long-terme.

1.3.4.2. Influence du pâturage de couverts sur le stock d'azote du sol

La fixation symbiotique d'azote par les Fabacées permet d'apporter de l'azote au sol qui pourra être mobilisé par la culture suivante. La quantité d'azote fixé par la symbiose bactérienne avec les Fabacées varie selon les espèces et les climats notamment. Une revue de la littérature estime que, en Europe, la féverole fixe $137 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Cependant d'autres espèces qui ont de plus faibles biomasses fixent moins d'azote. Le pois chiche ne fixe que $54 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, les vesces $59 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en Europe (Ladha *et al.*, 2022).

Longtemps utilisées pour leur fonction de piège à nitrate (et dénommées CIPAN - cultures intermédiaires pièges à nitrates), les cultures intermédiaires étaient, et sont toujours, implantées en priorité en période hivernale, durant la période de drainage intense, pour limiter la lixiviation de l'azote. Les espèces les plus souvent utilisées sont des Brassicacées qui ont une forte capacité à valoriser l'azote du sol rapidement en produisant une biomasse importante (Thomsen & Hansen, 2014). La moutarde représentait en 2017 environ 30% des surfaces en culture intermédiaire (Ballot, 2022). Abdalla *et al.*

(2019) montrent que tous les couverts végétaux diminuent les pertes d'azote par lixiviation, avec des niveaux divers d'efficacité. Des Fabacées, non Fabacées et des mélanges ont été testés dans cette revue et ces 3 types de couverts permettent en effet de limiter la lixiviation d'environ 50 à 35, de 75 à 45 et 40 à 25 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement sur les 100 premiers cm de profondeur de sol. Cet azote stocké dans la biomasse de la culture intermédiaire peut être restitué à la parcelle pour la culture suivante. Cependant, l'accessibilité de l'azote pour la culture principale diffère selon les cultures intermédiaires utilisées. L'association Brassicacées-Fabacées restitue mieux l'azote acquis à la culture suivante que les Brassicacées seules (Couedel *et al.*, 2018).

La disponibilité de l'azote acquis par les couverts pour la culture suivante dépend du processus de minéralisation de l'azote. Il a été montré que la composition chimique des résidus de cultures et notamment le rapport C/N sont des indicateurs de la dynamique de restitution de l'azote pour la culture suivante. Plus le rapport C/N est élevé et plus l'azote est immobilisé dans le sol. Trinsoutrot *et al.* (2000) ont montré qu'un rapport C/N inférieur 24 induit une augmentation de l'azote minéral dans le sol après 168 jours. Il est donc intéressant de s'intéresser à la composition des résidus du couverts pour anticiper les conséquences sur la culture suivante.

L'effet du pâturage sur le stock azoté du sol dépend de la pression de pâturage de la culture intermédiaire. Assmann *et al.* (2014) ont mené une expérimentation sur 9 ans de différentes pressions de pâturage d'une culture intermédiaire en mélange avoine-raygrass. Lorsque le couvert est maintenu toute la saison à 10 cm de hauteur, c'est-à-dire en condition de forte pression de pâturage, le stock azoté du sol diminue au bout des 9 années d'expérimentation. Lorsque la pression de pâturage est faible ou modérée (de 20 à 40 cm de hauteur de la culture intermédiaire), il n'y a pas d'effet sur le stock azoté du sol (Assmann *et al.*, 2014; Franzluebbbers & Stuedemann, 2015). Le stock azoté du sol peut aussi augmenter dans un système de pâturage de cultures intermédiaires hivernales. C'est le cas dans l'étude de Siri-Prieto *et al.* (2007) dans la modalité travaillée avec une sous-soleuse où le taux d'azote dans les 5 premiers cm de profondeur a augmenté de 56 % en 9 ans de cette pratique. La pression de pâturage y était faible : 5 bœufs juvéniles par hectare sur une période de 2,5 mois.

1.3.4.3. Influence du pâturage de couverts sur le stock de soufre dans le sol

Le soufre est un élément moins étudié que le carbone et l'azote. Cependant, la disponibilité du soufre dans les sols tend à diminuer et pourrait engendrer des pertes de rendements (Scherer, 2001). L'utilisation de couverts végétaux permet de diminuer la perte de soufre par lixiviation (Crespo *et al.*, 2021). Couedel *et al.* (2018) ont montré qu'un couvert composé de Fabacées et Brassicacées peut acquérir jusqu'à 12 kg S/ha et ensuite être utilisé pour restituer ce soufre pour la culture suivante. Les Brassicacées ont une teneur en soufre élevée comparé aux autres familles cultivées mais une alimentation riche en soufre semble être bénéfique pour la production animale (Tisdale, 1977).

1.4. Influence du pâturage de couverts sur la culture suivante

Une revue de la littérature de Peng *et al.* (2024) montre que les cultures intermédiaires augmentent le rendement de la culture suivante quel qu'elle soit de 2.4% en moyenne. Plus précisément, une culture intermédiaire de Fabacées pure augmente le rendement de la culture suivante de près de 10% alors que les cultures intermédiaires en mélange n'ont pas d'influence sur le rendement de la culture principale suivante.

Cependant, cette même étude montre que le contexte d'implantation des cultures intermédiaires module fortement l'influence sur la culture principale. En effet si la culture principale est un maïs, il y a une augmentation de rendement de 5% environ alors que s'il s'agit d'un blé, le rendement est diminué de 4 %. Le type de sol, le climat, le travail du sol interagissent avec la pratique des cultures intermédiaires et ces interactions influent sur le rendement de la culture principale.

Le pâturage de couverts n'a pas d'effet sur le rendement de la culture suivante dans la majorité des études aux Etats-Unis. Cependant certaines publications montrent des résultats variables qui peuvent être attribués à différents facteurs comme le travail du sol ou la météorologie de l'année (Blanco-Canqui *et al.*, 2023). Le pâturage de couverts n'influence pas négativement le rendement de la culture suivante au Brésil voire augmente même le rendement quand la biomasse produite des couverts est très importante (Carvalho *et al.*, 2018). L'étude de Bell *et al.* (2011) va dans le même sens que les études citées précédemment à savoir que le pâturage de couvert n'influence pas significativement le rendement de la culture suivante.

1.5. Problématique et hypothèses de l'étude

Nous avons identifié que la pratique du pâturage des couverts végétaux peut avoir des conséquences variées selon les contextes. Le chargement de la parcelle, le contexte météorologique, le contexte pédologique, les espèces pâturées, les espèces qui pâturent, la durée de pâturage, la période de pâturage sont autant de facteurs qui modulent les niveaux de services rendus par cette pratique sur la parcelle.

Cette étude cherche donc à apporter des éléments de réponse à la question suivante : **Quels sont les niveaux de services rendus par l'implantation de couverts plurispécifiques en interculture longue lorsqu'ils sont pâturés par des bovins et quels sont les éventuels disservices du pâturage de ces couverts ?**

Les hypothèses de recherche de cette étude sont les suivantes :

H1 : Les mélanges d'espèces fournissent des niveaux de fonctions écosystémiques satisfaisants : production de fourrage en quantité et en qualité ; effet piège à nitrate ; limitation de l'érosion physique par une couverture totale des sols

H2 : Le pâturage à fort chargement compacte le sol en surface (0-15 cm d'épaisseur)

H3 : Le pâturage des couverts permet une destruction quasi-totale du couvert avant le semis de printemps

H4 : Le pâturage de couvert permet de diminuer l'impact de l'exploitation sur le changement climatique

1.6. Projet de recherche et zone d'étude

1.6.1. Le projet COTERRA: Repenser les collectifs agricoles dans leurs territoires pour plus d'autonomie

Pour apporter des éléments de connaissances scientifiques et opérationnelles sur cette question des services et disservices liés au pâturage des cultures intermédiaires, des travaux spécifiques ont été initiés dans le cadre du programme de recherche-action participative COTERRA (Repenser les Collectifs agricoles dans leurs Territoires pour plus d'Autonomie), débuté fin 2022 sous la coordination de l'UMR DYNAMFOR d'INRAE Toulouse, et dont la finalité plus large est d'étudier des voies d'autonomisation des exploitations et de transition agroécologique des systèmes en analysant et en renforçant les complémentarités et équilibres culture-élevage sur le territoire du Nord-Comminges (Projet COTERRA).

Comme suggéré précédemment, le pâturage des couverts végétaux est un levier d'autonomie fourragère qui semble adapté au contexte du Nord-Comminges et pourrait permettre de limiter certains impacts environnementaux liés au maintien des sols nus en interculture longue. Cependant nous avons vu que les études menées sur l'influence du pâturage sur les parcelles sont peu nombreuses et il n'y a pas encore de consensus scientifique. Les agriculteurs et partenaires du projet sont donc intéressés pour produire des connaissances sur le sujet dans le contexte du Nord-Comminges et, en 2023, deux dispositifs expérimentaux ont ainsi été mis en place pour étudier la pratique du pâturage par des bovins sur différents mélanges d'espèces implantés en interculture longue.

1.6.2. Le territoire d'étude du Nord-Comminges

Dans le Sud-Ouest de la France, la part des cultures de printemps dans l'assolement est importante. En effet, 45 % des terres cultivées en grandes cultures le sont pour des cultures de printemps dans la région Midi-Pyrénées sur la période 2017-2021 (Recensement agricole, Agreste, 2020). Les intercultures longues sont donc fréquentes (entre un blé et un tournesol par exemple) dans cette région et le potentiel de développement des cultures intermédiaires est important en termes de surface. De plus, au vu du climat relativement doux à l'automne et en hiver, les couverts hivernaux nécessitant peu de degrés-jours pour se développer peuvent produire une biomasse intéressante.

Le territoire du Nord-Comminges se situe dans le piémont pyrénéen. La zone étudiée est la partie Sud du département de la Haute-Garonne. Dans ce département, le blé dur représente environ 18 % de la surface agricole utile, le tournesol 17%, le blé tendre 11% et le maïs 7% (Chambre d'agriculture de Haute-Garonne, 2024). Le Nord-Comminges une région vallonnée et rurale avec un paysage assez morcelé : bois, haies, grandes cultures, surfaces fourragères. Le système de polyculture-élevage y est très répandu (Recensement agricole, Agreste, 2020) avec des produits d'élevage inscrits dans des filières orientées sur la qualité : veau sous la mère, porc noir de Bigorre...(Cœur et coteaux de Comminges)

Les dynamiques de spécialisation et d'agrandissement des exploitations que l'on peut observer dans d'autres régions de France sont moins marquées en Nord-Comminges. Il y a un maintien du cheptel de bovin et une relative stabilité du système agricole dans cette région (Agreste Cœur et Coteaux du Comminges, 2020).

Une dérogation argile en zone vulnérable nitrate permet de laisser les parcelles à fort taux d'argile (> 31 %) en sol nu en interculture longue (Chambre d'agriculture de Haute-Garonne, 2023 ; Préfet de la région Occitanie, 2023). Cette pratique entraîne une érosion forte et des coulées de boues régulières lors d'épisodes pluvieux intenses. La problématique de l'érosion physique des sols dans une région vallonnée est donc importante et les syndicats de rivières rapportent la présence de particules en suspension dans les eaux de surface (SYGESAVE).

2. Analyser les performances de couverts pâturés : Matériels et méthodes

2.1. Sites expérimentaux

Deux parcelles d'essai ont été utilisées pour apporter des éléments sur le sujet du pâturage de couverts dans le Nord-Comminges. L'essai A est situé sur la commune de Saint-Médard 31360 (43°07'20.3"N 0°49'50.9"E) avec une pente moyenne de 4% (Géoportail). L'essai B est situé sur la commune de Ciadoux 31350 (43°14'03.9"N 0°44'41.2"E) avec une pente moyenne de 4% également (*annexe B*). Le Nord-Comminges est une région au climat océanique. Les données de la station météorologique de Palaminy située à environ 30 km des 2 sites expérimentaux sont présentés en Figure 1. Le cumul annuel moyen de précipitations est de 700 mm sur la période 2002-2022 avec un hiver et un printemps pluvieux. La température moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 10°C et le mois le plus chaud n'excède pas les 22°C donc d'après la classification de Köppen, le climat du Nord-Comminges est tempéré chaud sans saison sèche.

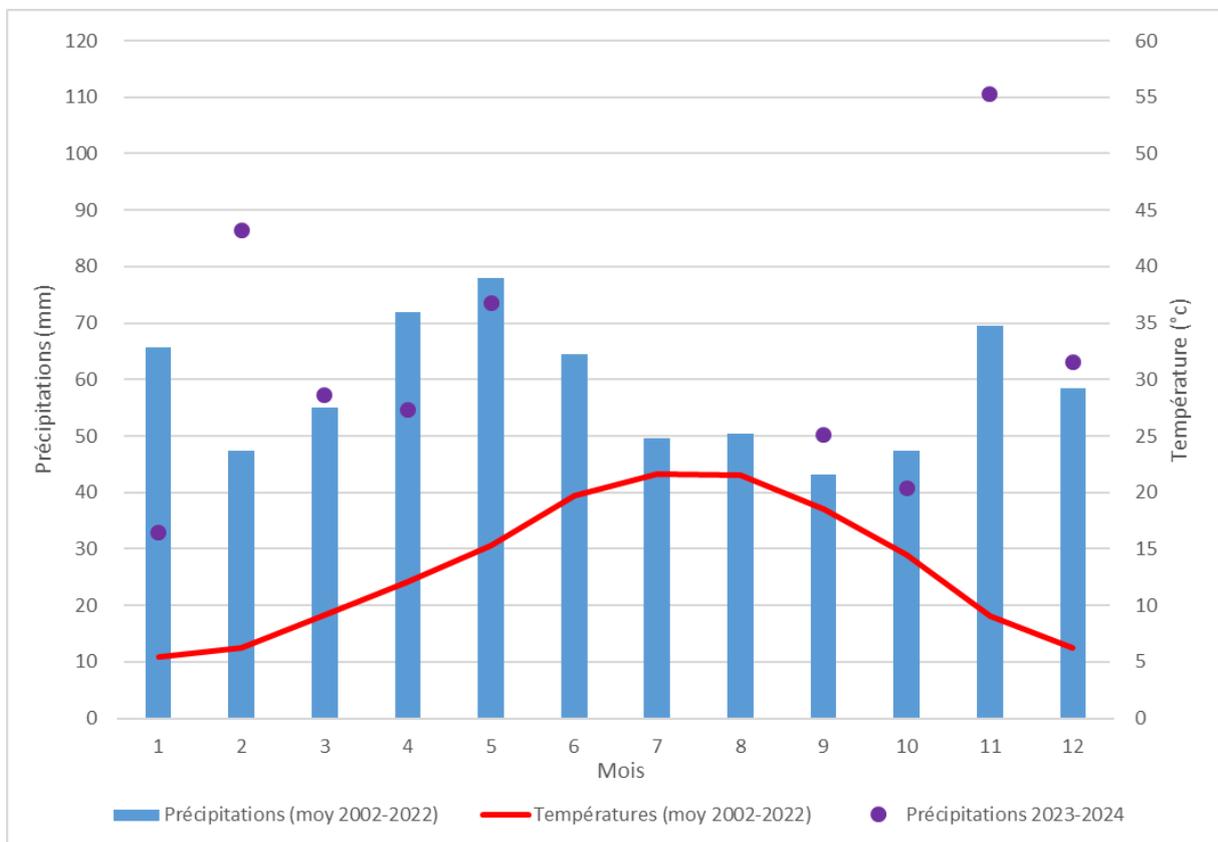


Figure 1 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Palaminy sur la période 2002-2022

Les deux essais sont gérés sans labour depuis 2019 au moins. L'essai A reçoit régulièrement des apports de matière organique sous forme de fumier, déjections lors du pâturage et est gérée en agriculture biologique. Le précédent sur l'essai A est un tournesol. L'essai B est en conventionnel et le précédent est un triticale.

Site expérimental	Horizon (cm)	Argile (%) ± ic	Limons (%) ± ic	Sable (%) ± ic	Matière organique (%) ± ic	pH KCl ± ic	CEC potentiel (cmol+/kg) ± ic
Essai A	0-30	22,9 ± 4,1	48,7 ± 6,1	28,4 ± 7,6	2,2 ± 0,4	4,7 ± 0,3	7,9 ± 1,4
Essai A	30-60	23,1 ± 3,7	47,8 ± 6,1	29,1 ± 5,3	0,8 ± 0,2	4,7 ± 0,5	6,9 ± 1,4
Essai A	60-90	29,1 ± 2,8	46,3 ± 3,6	24,5 ± 4,5	0,5 ± 0,2	4,6 ± 0,5	8,2 ± 0,8
Essai B	0-30	19,9 ± 7,5	54,4 ± 4,2	25,7 ± 11,5	1,9 ± 0,2	7,3 ± 0,2	7,6 ± 2
Essai B	30-60	24,4 ± 6,6	51,6 ± 8,1	24 ± 12,8	0,8 ± 0,3	6,3 ± 0,5	6,9 ± 1,2
Essai B	60-90	33,4 ± 10,3	47,1 ± 8,7	19,5 ± 5,1	0,6 ± 0,4	6,3 ± 0,4	9,4 ± 3,6

Tableau 1 : Caractéristiques du sol des essais sur 3 horizons

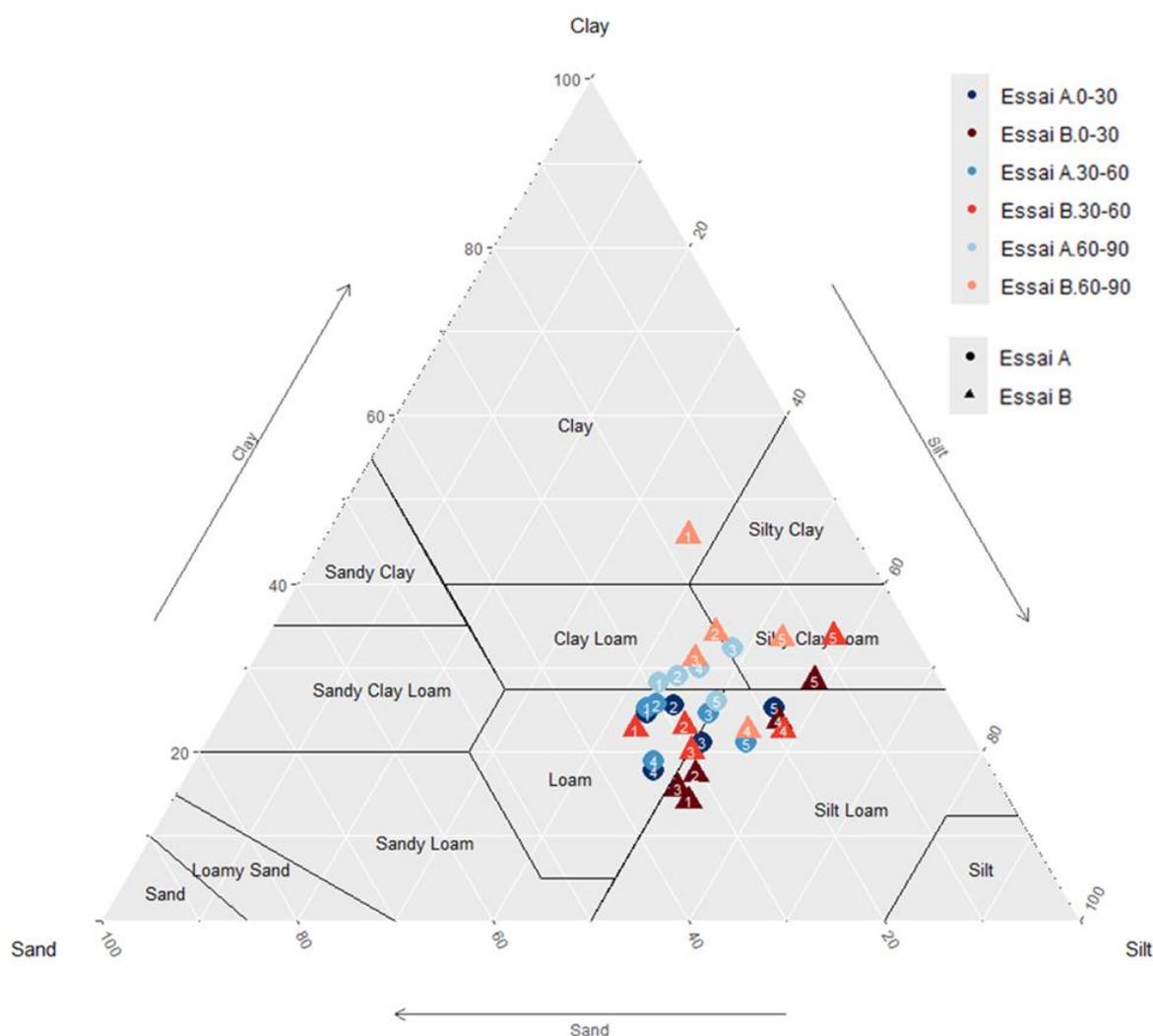


Figure 2 : Texture du sol des différents blocs (n° 1 à 5) des 3 horizons des 2 sites expérimentaux sur le triangle des textures de l'USDA

Les deux sites expérimentaux sont sur des sols loam, loam-limoneux, loam argileux ou loam limono-argileux d'après la classification de l'USDA (Figure 2). Nous observons une plus grande hétérogénéité sur l'essai B avec les blocs 4 et 5 qui sont moins riches en sable alors que l'essai A est assez homogène. L'horizon de surface (0-30 cm) est assez riche en matière organique sur les deux sites puisqu'il varie entre 18 et 26 g/kg sur l'essai A et entre 17 et 22 g/kg sur l'essai B (

Tableau 1). Par ailleurs, le pH KCl de l'essai A est assez acide alors que sur l'essai B il est plutôt basique. L'essai B est assez hétérogène. En effet, il y a un gradient de la proportion de cailloux dans le sol du bloc 1 vers le bloc 5 suivant la pente de la parcelle. Il y a près de 43 % de cailloux en masse sèche sur les 25 premiers cm de sol sur le bloc 1 alors qu'il y en a 2% sur le bloc 5. Cette hétérogénéité peut expliquer la variabilité observée au champ sur le développement des couverts.

2.2. Design expérimental

Les couverts étudiés sont des couverts plurispécifiques avec au moins une espèce de Poacées, Brassicacées et Fabacées car ces familles botaniques ont des niveaux de performances complémentaires sur les fonctions écosystémiques étudiées. Chaque essai est découpé en 5 blocs randomisés de 3 parcelles (*Annexe B*). Chaque parcelle fait environ 900 m². 3 modalités sont semées par essai et 2 modalités sont communes aux essais A et B. Le remplissage est une prairie à base de raygrass sur l'essai A et du blé tendre sur l'essai B. La modalité 1 n'a pas été semée sur les blocs 4 et 5 de l'essai B à cause d'un problème technique. Cette modalité ne compte donc que 3 répétitions. Le Tableau 2 détaille les espèces et densités de semis des différentes modalités. Les semis ont été faits début septembre après un travail du sol superficiel pour préparer le lit de semence. Aucune opération mécanique, fertilisation ou utilisation de produit phytosanitaire n'a été faite pendant le cycle de développement des couverts. Le pâturage a eu lieu tardivement c'est-à-dire à partir de fin mars en raison de conditions météorologiques trop pluvieuses pendant l'hiver. En effet, le cumul de pluie entre novembre 2023 et mars 2024 a été excédentaire de 55mm par rapport à la moyenne 2002-2022 avec un mois de novembre particulièrement pluvieux qui a saturé le sol dès le début de l'hiver (Figure 1).

Modalité	Espèce	Variété	Dose de semis (kg/ha)
Couvert 1	Colza fourrager	Wilma	3
	Radis fourrager	Triangel	0,5
	Triticale	LUMACO	80
	Trèfle incarnat	Cegalo	1,0
	Phacélie	Maja	0,5
Couvert 2	Colza fourrager	Wilma	3
	Avoine noire	Black Haras	1,5
	Féverole d'hiver	Nairobi	40
	Vesce commune d'hiver	Rubis	8
	Vesce commune de printemps	Nacre	8
Couvert 3A	Colza fourrager	Wilma	3
	Moutarde blanche	Architect	6
	Seigle Lignée	RUBIN	30
	Trèfle d'Alexandrie	Lorena	6
	Trèfle incarnat	Cegalo	1,0
Couvert 3B	Colza fourrager	Wilma	3
	Blé	Semence de ferme	30
	Orge	Semence de ferme	30
	Brome Cathartique	RGT OMBEL	20
	Brome sitchensis	Verlica	20
	Trèfle blanc nain	Avalon	5
	Vesce commune d'hiver	Rubis	1,5

Tableau 2 : Espèces et densités de semis des différentes modalités

Les essais ont été pâturés par les troupeaux bovins présents sur l'exploitation agricole. L'essai A a été pâturé par 75 vaches laitières de race Prim'Holstein entre le 21 et 26 mars en pâturage tournant dynamique à raison de 1 bloc et une allée par jour. L'essai B a été pâturé par 11 génisses de race Angus entre le 20 mars et le 22 avril en pâturage libre sur l'essai.

2.3. Mesures effectuées

Les mesures effectuées sur les essais renseignent sur les niveaux de performance des modalités sur les fonctions écosystémiques. Une première campagne de prélèvements a été menée avant le pâturage pour évaluer l'état initial et une seconde campagne avec les mêmes mesures a été réalisée après pâturage pour quantifier l'effet de cette pratique sur les couverts (*annexe A*). Une campagne intermédiaire au mois de décembre a été menée sur l'essai A uniquement sur les mesures liées aux plantes. Lorsque cela n'était pas trop chronophage, les mesures ont été faites à 2 emplacements distincts et éloignés dans chaque parcelle puisque celles-ci font environ 900m². Il s'agit d'un compromis entre le temps de mesure et la représentativité de la variabilité intra parcellaire.

2.3.1. Mesures sur les plantes

Les prélèvements de plantes visent à caractériser l'évolution du couvert au cours du temps et à analyser les comportements des espèces au sein des mélanges. Lors des prélèvements de plantes, les familles botaniques ont été séparées et quand cela était possible, les espèces ont été différenciées. Par exemple les Poacées n'ont pas été différenciées. Les adventices ont été séparées des espèces semées quand cela était possible.

2.3.1.1. Mesure de la biomasse

La mesure de la biomasse aérienne et racinaire permet d'évaluer la pousse et la consommation du couvert par les bovins. Elle permet d'évaluer quantitativement la ressource fourragère. La biomasse

aérienne des couverts a été mesurée sur des quadrats de 0.5 m². Deux quadrats ont été prélevés par parcelle pour évaluer la variabilité intra-parcellaire. Les échantillons ont été séchés à 80 °C pendant 48h dans le but d’analyser les quantités d’éléments acquis par la biomasse.

Des plantes entières (partie aérienne et racinaire) ont également été prélevées uniquement au mois de décembre (essai A) et avant pâturage (essais A & B). Les parties aériennes et racinaires ont été séparées, pesées en frais, séchées à 80°C pendant 48h puis pesées en sec. Cette mesure permet d’estimer la biomasse racinaire relativement à la biomasse aérienne.

2.3.1.2. Mesure des teneurs en carbone, azote et soufre

Les teneurs en éléments renseignent les fonctions écosystémiques de stockage de carbone et réduction de la lixiviation de l’azote notamment. Les échantillons de biomasse aérienne et racinaire prélevés et séchés à 80°C pendant 48h sont ensuite broyés en poudre fine. Des capsules de 50 mg de poudre mélangés à 50 mg de tungstène sont préparés dans une enveloppe en étain. Ces capsules permettent de doser le carbone, l’azote et le soufre présent dans les échantillons par chromatographie en phase gazeuse (Kaczmarek & Gondko, 1986; Pella & Colombo, 1973). Les teneurs obtenues sont ensuite multipliées par les données de biomasses en t MS/ha pour évaluer les quantités de minéraux acquises par les couverts.

2.3.1.3. Calcul de la minéralisation des résidus de couverts

L’estimation de la dynamique de minéralisation des résidus repose sur les analyses de la biomasse aérienne après pâturage. Les estimations à J28, J84 et J168 après destruction du couvert. L’article de Justes *et al.* (2009) permet d’estimer l’azote minéralisé par unité de carbone apporté au système à ces dates. Les équations de cet article ont été adaptées comme suit pour exprimer une quantité d’azote minéralisé par unité surface :

$$N_{\min 28} = C_{\text{acquis AP}} * \left(0.7 * \frac{N}{C} - 36.49 \right) * 10^{-6}$$

$$N_{\min 84} = C_{\text{acquis AP}} * \left(0.8 * \frac{N}{C} - 33.15 \right) * 10^{-6}$$

$$N_{\min 168} = C_{\text{acquis AP}} * \left(0.72 * \frac{N}{C} - 26.57 \right) * 10^{-6}$$

Avec N_{\min} en kgN/ha, C_{acquis} en g/ha et N/C en mgN/gC

2.3.1.4. Mesure de la valeur alimentaire

Les échantillons de biomasse aérienne prélevés avant pâturage sont aussi utilisés pour évaluer la qualité fourragère des couverts. Des sous-échantillons ont été séchés à 60°C pendant 72h (au lieu de 80°C pendant 48h) dans le but de préserver au maximum les tissus végétaux de toute dégradation par la température. Les échantillons ont ensuite été analysés par le laboratoire INOVALYS (Nantes, France). Les analyses demandées sont les suivantes : matières minérales (g/kg MS), matières azotées totales (g/kg MS), cellulose (g/kg MS), digestibilité de la cellulose (% MS), sucres solubles totaux (% MS) et constituants pariétaux (g/kg MS). Les variables calculées reprennent les équations de l’ouvrage *L’alimentation des ruminants* (INRAE, 2018). Les équations utilisées sont détaillées en *annexe C*. Les variables calculées UFL (Unité fourragère laitière en UF/kg MS) et PDI (Protéines digestibles dans l’intestin en g/kg MS) renseignent respectivement sur l’énergie et les protéines disponibles dans la

ration. Ces variables sont croisées à la biomasse produite et comparées aux besoins du troupeau. Cela permet d'estimer le temps de pâturage théoriquement possible. Les équations utilisées sont présentées en *annexe C*.

2.3.2. Mesures sur le sol

2.3.2.1. Mesure de la granulométrie et des reliquats azotés

La granulométrie permet de caractériser la parcelle et elle peut apporter des éléments d'explication sur la variabilité des données. Les reliquats azotés permettent de quantifier l'azote disponible dans le sol au semis. Ils seront mobilisés dans l'analyse de la dynamique de l'azote. Pour cela, des échantillons de sol ont été prélevés au semis et avant pâturage. Les prélèvements de sol sont faits à 3 horizons : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm de profondeur. Plusieurs points de prélèvements sont effectués par parcelle et les échantillons de terre sont ensuite poolés par horizon et par bloc au semis, par horizon et par parcelle avant pâturage. Des sous-échantillons avant pâturage sont fait pour les analyses granulométrique menées par le laboratoire LAS ARRAS (Saint-Laurent-Blangy, France). Tous les échantillons de sol sont conservés au réfrigérateur. La détermination des reliquats azotés se fait dans le laboratoire de l'équipe AGIR (Castanet Tolosan, France) par extraction des ions nitrates et ammonium à l'aide d'une solution de chlorure de potassium puis par spectrophotométrie. L'azote minéral du sol est la somme des concentrations en nitrate et ammonium. La quantité d'azote minéral disponible par horizon est déterminée à l'aide de la densité apparente de l'horizon pour un sol moyen.

2.3.2.2. Tests VESS et comptages de vers de terre

Le test VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) permet de caractériser grossièrement la structure d'un sol sur 0-25 cm (Agrotransfert, 2018). Il s'agit d'une notation sur l'aspect des agrégats (*Annexe D*). Cette mesure se fait à l'aide d'une simple bêche car nous prélevons une tranche de sol verticale dans une petite fosse creusée à la bêche. Le test VESS renseigne sur la structure, la macroporosité, l'activité biologique du sol. Le comptage des vers de terre se fait en même temps que le test VESS et renseigne sur l'activité biologique du sol. Il a été fait par fourchettes de nombre. Les vers sont classés par type : épigé, endogé, anécique et par âge : juvénile, post-juvénile, adulte. Ces mesures ont été faites avant et après pâturage avec 2 points de mesure par parcelle, quand cela était possible. Les tests VESS n'ont pas été fait sur l'essai A avant pâturage car le sol était sursaturé en eau. Le comptage des vers de terre n'a pas été fait après pâturage sur l'essai A. Sur l'essai B, le sol était saturé en eau sur les blocs 4 et 5 avant pâturage donc les mesures n'ont pas été faites.

2.3.2.3. Mesure de la densité apparente

La densité apparente du sol permet de quantifier la porosité et la teneur en eau du sol. Cette mesure renseigne donc sur la compaction et la rétention en eau du sol. La mesure a été faite avant et après pâturage à raison de 2 zones de prélèvements par parcelle et à 5 et 15 cm de profondeur. Des petites fosses sont ouvertes à la bêche puis des cylindres de terre de 250 cm³ sont prélevés horizontalement sur la face non piétinée de la fosse. Les échantillons sont séchés à 105°C pendant 48h. Ils sont ensuite pesés en sec. La densité apparente de l'échantillon est le rapport de la masse sèche de l'échantillon sur le volume du cylindre. Dans ce rapport, nous nous intéresserons principalement à la porosité. La porosité est déterminée par la formule suivante :

$$porosité\ totale = \frac{(\rho_{particules} - \rho_{échantillon})}{\rho_{particules}}$$

où $\rho_{particules} = 2.65g/cm^3$ d'après Skopp (Huang *et al.*, 2018).

2.3.2.4. Mesure de la stabilité structurale du sol

La stabilité structurale est un indicateur qui renseigne sur la sensibilité d'un sol à l'érosion. Dans cette étude, la stabilité structurale est évaluée par le Slake test qui consiste à plonger des échantillons de sol dans un volume d'eau et à quantifier les particules qui se détachent de l'échantillon. Cette stabilité structurale dépend de la texture du sol et de l'activité biologique puisque la glomaline (protéine sécrétée par des champignons) permet de stabiliser les agrégats (Wright & Upadhyaya, 1996). Des échantillons de sol sous forme de cylindre de 8 cm de profondeur et 8 cm de diamètre sont prélevés verticalement à la surface du sol avant et après pâturage. Un seul échantillon est prélevé par campagne et par parcelle. Les échantillons sont conservés en environnement réfrigéré. L'équipe technique de VASCO a développé un prototype qui permet de suivre l'évolution du décrochage de particules de l'échantillon de sol au cours du temps (*Annexe H*). Le dispositif utilise un programme Arduino qui plonge et remonte les échantillons de l'eau sur plusieurs cycles de temps croissant. Une balance sous le récipient d'eau permet d'enregistrer la masse au cours du temps. L'idée du dispositif est un peu la même que dans l'article de Vanwindekens & Hardy (2023) mais les masses mesurées sont celles du bocal d'eau. Les échantillons et particules décrochées sont ensuite séchés à 105°C pendant 48h puis pesés. Certains échantillons sont saturés en eau par un système d'aspersion pendant 14h et d'autres sont séchés à 40°C pendant 10j avant le Slake test. Tous les échantillons sont pesés juste avant l'immersion. Le dispositif étant encore au stade expérimental, les échantillons du projet COTERRA ont aussi pour but d'améliorer le dispositif.

2.3.2.5. Mesure de la résistance à la pénétration

La résistance du sol à la pénétration permet de caractériser la compaction du sol en estimant la pression nécessaire aux racines pour se développer verticalement dans le sol. Cette mesure consiste à enfoncer une pointe métallique dans le sol humide mais ressuyé jusqu'à 45 cm de profondeur. Le pénétromètre Fieldscout SC900 utilisé dans cette étude enregistre la pression exercée pour enfoncer la pointe aux différentes profondeurs. Il y a eu 10 mesures par parcelle avant et après pâturage. Les conditions climatiques sèches après pâturage sur l'essai B n'ont pas permis de faire les mesures sur les blocs 1 et 2. Sur les deux sites expérimentaux, selon les parcelles, le nombre de mesures faites peut varier du fait des conditions de mesure et de la texture du sol.

2.3.2.6. Mesure du carbone labile et de la respiration basale

Le carbone labile est mesuré par la méthode POXC (Permanganate oxidizable carbon). Il renseigne sur la fertilité du sol et le stockage de carbone dans le sol (Culman *et al.*, 2012). Le carbone mesuré est minéralisable par les microorganismes du sol donc la mesure de la respiration basale est complémentaire de la mesure POXC pour quantifier l'activité des microorganismes du sol. Pour ces mesures, des échantillons de sols ont été prélevés entre 10 et 20 cm de profondeur avant et après pâturage à raison de 1 échantillon par parcelle pour POXC et 1 échantillon par parcelle pour la respiration basale. Seuls les blocs 1, 3 et 5 ont été prélevés sur l'essai A. Les échantillons ont été conservés en environnement réfrigéré puis ont été analysés par le laboratoire SCOP SAGNE (Péchaudier, France).

2.4. Calcul des niveaux de performances des services écosystémiques

Nous avons décrit dans la partie 2.3. les mesures effectuées pour estimer les niveaux des fonctions écosystémiques. Les indicateurs sont ensuite utilisés pour une analyse multifonction qui a pour but de caractériser les performances multifonctionnelles des modalités. Cette analyse est inspirée des travaux de Garba *et al.*(2024) et Schipanski *et al.*(2014). Le

Tableau 3 décrit les variables utilisées par fonction écosystémique et leurs éventuelles transformations. Dans le cas où les valeurs croissantes indiquent des meilleures performances, les données sont ensuite normalisées avec la fonction suivante $X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ où X_{min} et X_{max} sont respectivement les valeurs minimale et maximale observées dans le jeu de données pour la variable X considérée. X_{norm} est la variable normalisée dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Dans le cas où les valeurs croissantes indiquent de moins bonnes performances (compaction du sol), la fonction $X_{norm} = 1 - \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ est appliquée pour que la valeur 1 de la variable normalisée corresponde toujours au meilleur niveau de performance observé.

Service recherché	Fonction écosystémique	Indicateur	Transformation des données
Approvisionnement	Quantité de fourrage	Biomasse aérienne (t MS/ha)	$Biomasse_{aérienne\ parcelle} = 10000 * (\sum_{quadrats} \sum_{espèces} biomasse_{aérienne})$
Approvisionnement	Valeur alimentaire du fourrage	UFL (UF/kg MS)	Annexe C
Régulation du climat	Acquisition de carbone	C acquis (kg/ha)	$C_{acquis} = C_{acquis\ aérien} + C_{acquis\ racinaire}$
Support	Acquisition d'azote	N acquis (kg/ha)	$N_{acquis} = N_{acquis\ aérien} + N_{acquis\ racinaire}$
Support	Compaction du sol	Densité apparente (g/cm ³)	$\Delta d = \frac{\sum densité\ ap}{n_{ap}} - \frac{\sum densité\ av}{n_{av}}$ Avec Δd la différence de densité moyenne entre campagnes, n le nombre de mesures
Support	Minéralisation des résidus	N minéralisé à 28j après destruction du couvert (kg/ha)	$N_{min\ 28} = C_{acquis\ AP} * \left(0.7 * \frac{N}{C} - 36.49\right) * 10^{-6}$ Avec $C_{acquis\ AP}$ en g/ha et $\frac{N}{C}$ en mgN/gC

Tableau 3: Fonctions écosystémiques et indicateurs utilisés dans le cadre de l'analyse multifonction

2.5. Analyse statistique

L'analyse des données a été effectuée avec Microsoft Excel 2019 et R studio avec la version R 4.4.1. Des modèles linéaires construits par minimisation du critère d'Akaike permettent d'expliquer les données avec les variables les plus explicatives. Les modèles ont ensuite été testés dans le but de faire une ANOVA. Le test de Durbin-Watson renseigne sur l'indépendance des résidus. Le test de Levene permet de vérifier l'hypothèse d'homogénéité des variances. Le test de Shapiro-Wilk est utilisé pour vérifier l'hypothèse de normalité des résidus dans le cas d'un jeu de données de moins de 50 individus et le test de Kolmogorov-Smirnov est utilisé à la place dans les jeux de données plus conséquents. Lorsque ces tests valident les hypothèses de l'ANOVA, une ANOVA à un ou deux facteurs a été réalisée selon les modèles retenus. Le test de Tukey a été fait dans les cas où l'ANOVA a montré des différences significatives entre des groupes d'individus.

3. Résultats

3.1. Analyse de la ressource fourragère produite par les couverts

3.1.1. Biomasse produite par les couverts

La biomasse produite par les couverts a été analysée en séparant la biomasse aérienne de la biomasse racinaire. La Figure 3 présente les biomasses des couverts au cours du temps. Les biomasses aériennes produites par les couverts ne sont pas significativement différentes entre les modalités au sein des sites expérimentaux. La biomasse disponible au pâturage est de 5 à 6 t MS/ha sur l'essai A et 3 à 4 t MS/ha sur l'essai B. Cependant, les intervalles de confiance sont importants, par exemple sur l'essai A, l'intervalle de confiance de la modalité 1 avant pâturage est de 4.5 à 7.5 t MS/ha.

Sur l'essai A, nous observons une augmentation significative de la biomasse totale sur la modalité 1 entre décembre et début mars. Nous observons une augmentation de la biomasse sur les modalités 2 et 3B de l'essai B pendant la période de pâturage. La pousse des couverts pendant la période de pâturage sur l'essai A a donc été compensée par la consommation du troupeau. A l'opposée, la consommation sur l'essai B n'a pas compensé la pousse du couvert sur une plus longue période. Il y a une prédominance du colza fourrager dans tous les mélanges sauf pour la modalité 3A où la moutarde blanche concurrence le colza surtout au début de l'essai. Le colza représente 50 à 80% de la biomasse aérienne sur l'essai B selon les parcelles. La moutarde blanche a fini son cycle rapidement d'où une tendance à la diminution de la biomasse de cette espèce au cours du temps. Les Poacées sont plus présentes sur l'essai B que sur l'essai A en importance relative dans la composition du couvert. Les prélèvements début décembre sur l'essai A montrent que la ressource fourragère en quantité était disponible pour un pâturage hivernal puisque les 3 modalités ont une biomasse aérienne supérieure à 3 t MS/ha.

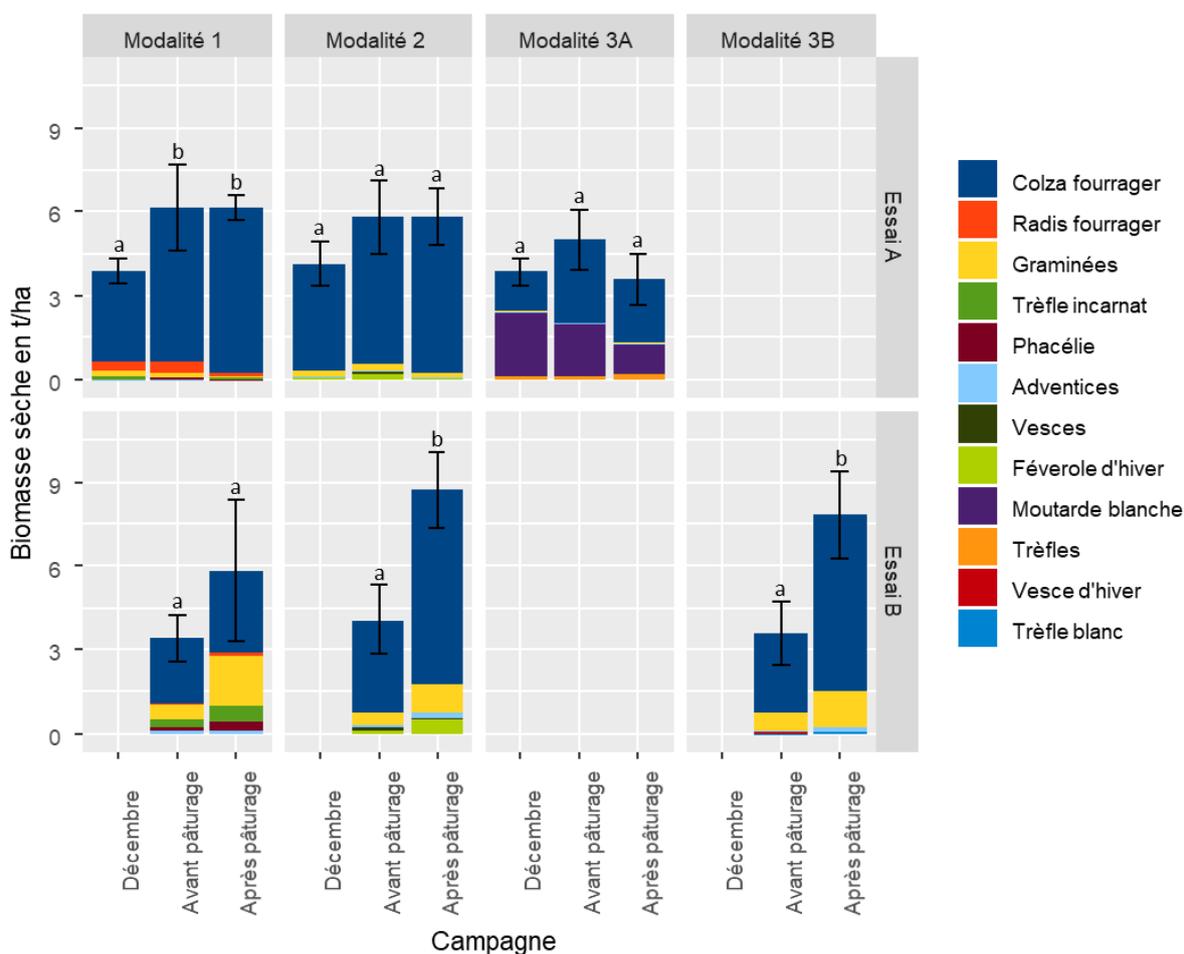


Figure 3 : Biomasse aérienne sèche par modalité au cours du temps sur les deux sites. Les intervalles de confiance sur la biomasse totale de la modalité sont représentés. Les lettres représentent les tests de Tukey sur l'effet de la campagne au sein des modalités

3.1.2. Valeur alimentaire des couverts

La ressource fourragère est donc présente en termes de quantité mais la qualité fourragère du couvert est également importante pour que le troupeau le consomme. Les grandeurs calculées à partir des analyses chimiques des échantillons sont représentées dans le

Tableau 4. Nous observons que les UF sont assez élevés. Les UFL se situent entre 0.88 pour la valeur la plus faible et 1.10 pour la valeur la plus élevée. Les PDI sont de l'ordre de 90 g/kg MS. La balance protéique ruminale (BPR) est négative dans 4 cas sur les 6 mais avec un intervalle de confiance élevé. Les rapport PDI/UF sont de l'ordre de 85 g/UF sauf pour la modalité 3A qui est moins riche en énergie. Les UE sont proches de 1. Sur les variables représentées, il y a peu de différences entre les modalités et essais sauf la modalité 3A qui est significativement moins énergétique que les autres.

Modalité	Site	UFL ± ic	UFV ± ic	PDI ± ic	BPR ± ic	PDI/UFL ± ic	PDI/UFV ± ic	UEL ± ic	UEB ± ic
Modalité 1	Essai A	1,10 ± 0,14 a	1,09 ± 0,17 a	96,9 ± 26,3 a	21,2 ± 95,7 a	87,9 ± 17,7 a	88,5 ± 17,2 ab	0,97 ± 0,09 a	0,97 ± 0,16 a
Modalité 1	Essai B	1,06 ± 0,01 a	1,05 ± 0,04 a	89,9 ± 2,1 a	-0,59 ± 10,65 a	84,9 ± 2,85 a	85,6 ± 5,06 ab	0,99 ± 0,03 a	1,00 ± 0,05 a
Modalité 2	Essai A	1,06 ± 0,14 a	1,04 ± 0,17 a	87,8 ± 14,9 a	-9,91 ± 37,10 a	82,7 ± 4,20 a	84,1 ± 3,33 a	1,00 ± 0,07 a	1,03 ± 0,12 a
Modalité 2	Essai B	1,09 ± 0,05 a	1,09 ± 0,06 a	94,3 ± 6,6 a	11,7 ± 21,9 a	86,2 ± 3,30 a	86,6 ± 3,27 ab	0,97 ± 0,02 a	0,98 ± 0,04 a
Modalité 3A	Essai A	0,88 ± 0,07 b	0,82 ± 0,09 b	82,1 ± 3,6 a	-2,42 ± 8,56 a	93,7 ± 4,71 a	100,2 ± 7,25 b	1,04 ± 0,03 a	1,10 ± 0,06 a
Modalité 3B	Essai B	1,04 ± 0,04 a	1,02 ± 0,05 a	86,2 ± 4,1 a	-12,3 ± 11,2 a	83,3 ± 1,54 a	84,9 ± 1,27 a	1,01 ± 0,02 a	1,04 ± 0,05 a

Tableau 4: Valeurs alimentaires des couverts en fonction des modalités et des sites expérimentaux. Les intervalles de confiance sont présentés (ic). Les lettres représentent les résultats des tests de Tukey par variable

Le

Tableau 5 présente les temps de pâturage théorique selon la part de biomasse aérienne des couverts consommée par un troupeau de 75 vaches laitières qui produisent chacune 19.5 kg lait/j (d'après la production moyenne du troupeau de l'essai A). Selon les modalités, le troupeau considéré peut pâturer entre 2 et 5 jours sur une surface d'un hectare si la totalité de la biomasse est consommée. Une hypothèse plus raisonnable serait que 50% de la biomasse soit consommée et dans ce cas, le troupeau peut pâturer 1 à 3 jours sur 1 hectare. Une Anova a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes. Par contre, il y a un effet significatif de l'interaction Lieu:Bloc. Nous observons que le temps de pâturage sur l'essai B est moins important que sur l'essai A en moyenne. L'effet bloc peut expliquer les intervalles de confiances très élevés. En effet, la quantité de biomasse produite varie selon les blocs du fait de l'hétérogénéité du site expérimental.

Modalité	Site	Temps de pâturage théorique (100%) ± ic	Temps de pâturage théorique (75%) ± ic	Temps de pâturage théorique (50%) ± ic
Modalité 1	Essai A	5,7 ± 3,4	4,3 ± 2,5	2,8 ± 1,7
Modalité 1	Essai B	2,7 ± 1,4	2 ± 1,1	1,3 ± 0,7
Modalité 2	Essai A	5,5 ± 1,8	4,1 ± 1,4	2,8 ± 0,9
Modalité 2	Essai B	3,5 ± 3,1	2,6 ± 2,3	1,7 ± 1,5
Modalité 3A	Essai A	4,0 ± 1,5	3,0 ± 1,1	2,0 ± 0,8
Modalité 3B	Essai B	3,2 ± 2,2	2,4 ± 1,6	1,6 ± 1,1

Tableau 5: Temps de pâturage théorique par hectare selon la part de biomasse aérienne consommée par le troupeau (100%, 75%, 50%). Les intervalles de confiance sont représentés (ic)

3.1.3. Acquisition d'éléments par les couverts

L'acquisition d'éléments a été évaluée en multipliant la biomasse des couverts par la teneur en éléments mesurée sur les échantillons prélevés. Les teneurs en éléments ont été mesurées sur les parties aériennes et racinaires séparément.

3.1.3.1. Acquisition de carbone par les couverts

La Figure 4 présente les quantités de C acquises par la biomasse au cours du temps selon les essais et les modalités. Jusqu'à plus de 3 tC /ha ont été acquis par les modalités 2 et 3B sur l'essai B. Le C du système racinaire représente jusqu'à 500 kg/ha alors que le C de la partie aérienne du couvert peut représenter jusqu'à plus de 2500 kg/ha sur l'essai A. Nous avons vu dans le paragraphe 3.1.1 que la biomasse avant et après pâturage était sensiblement la même sur l'essai A mais qu'elle avait augmenté sur l'essai B. Nous retrouvons cette même évolution concernant le carbone acquis.

Le pâturage ayant peu réduit la biomasse des couverts surtout sur l'essai B, un broyage et travail du sol superficiel ont été effectués. Sur l'essai A plusieurs déchaumages ont été nécessaires pour détruire complètement le couvert. Ces opérations ont permis d'enfouir les résidus des couverts et le carbone acquis par les couverts va être transformé par l'activité biologique du sol pendant la prochaine culture.

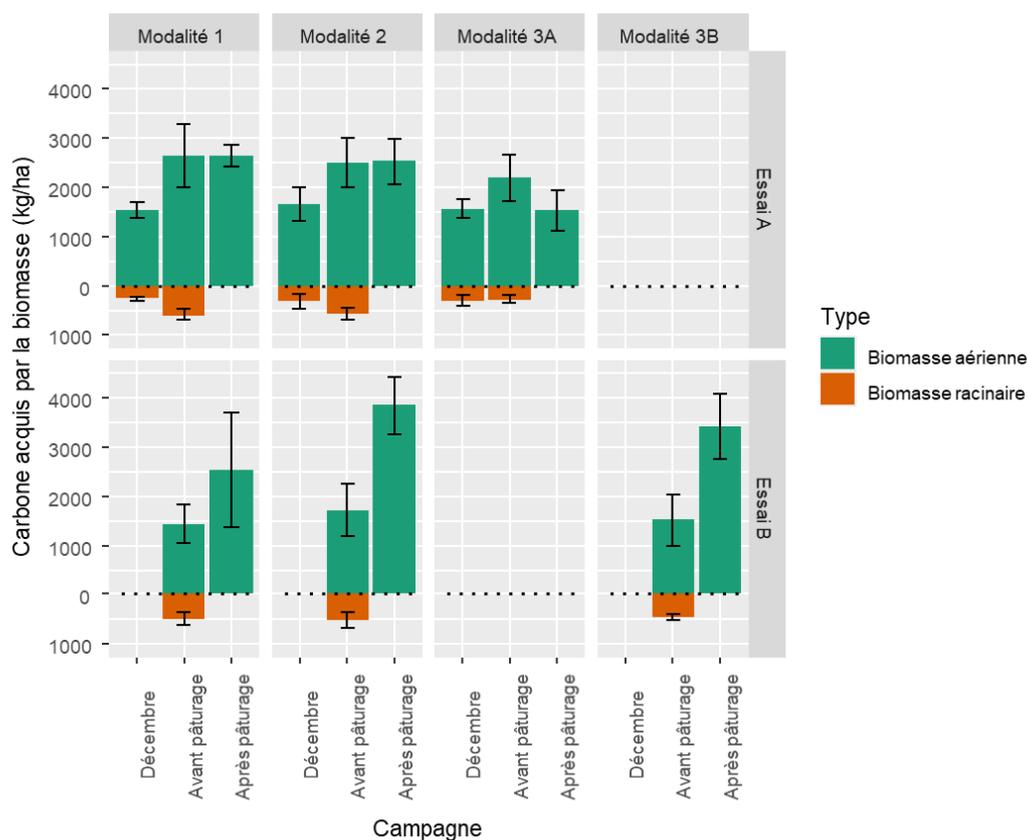


Figure 4 : Carbone acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés

3.1.3.2. Acquisition d'azote et restitution par les couverts

La Figure 5 représente l'azote acquis par la biomasse totale (racinaire et aérienne) entre le semis et début mars en fonction des reliquats azotés sur 90 cm de profondeur au semis. Nous observons une

tendance à l'augmentation de l'azote acquis en fonction des reliquats mais la variabilité des résultats est très importante. L'essai A a des reliquats azotés très forts au semis pour une parcelle en bio et certains couverts ont acquis plus de 150 kg N/ha. Etant donné la faible biomasse des Fabacées dans les couverts (cf 3.1.2.), nous pouvons faire l'hypothèse que la grande majorité de l'azote représenté ici est de l'azote minéral du sol acquis par les couverts. Les couverts ont donc joué un rôle de CIPAN. La Figure 6 montre que l'azote acquis par le couvert diminue pendant le pâturage sur l'essai A à l'inverse de l'essai B. Le troupeau de l'essai A a consommé beaucoup de feuilles qui sont les organes riches en azote. L'essentiel de l'azote acquis par le couvert se trouve dans la partie aérienne (90%).

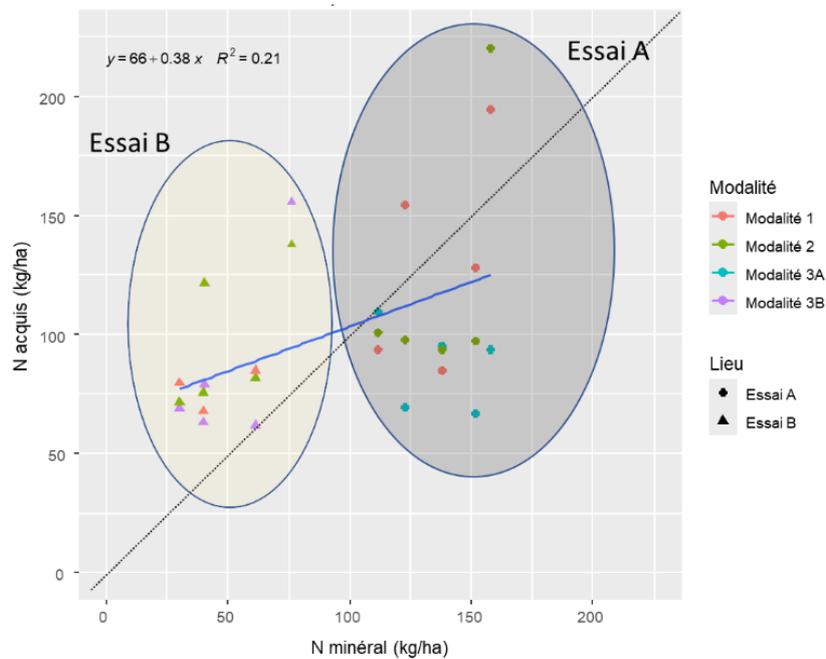


Figure 5 : Relation entre l'azote acquis par le couvert en sortie d'hiver et les reliquats azotés au semis

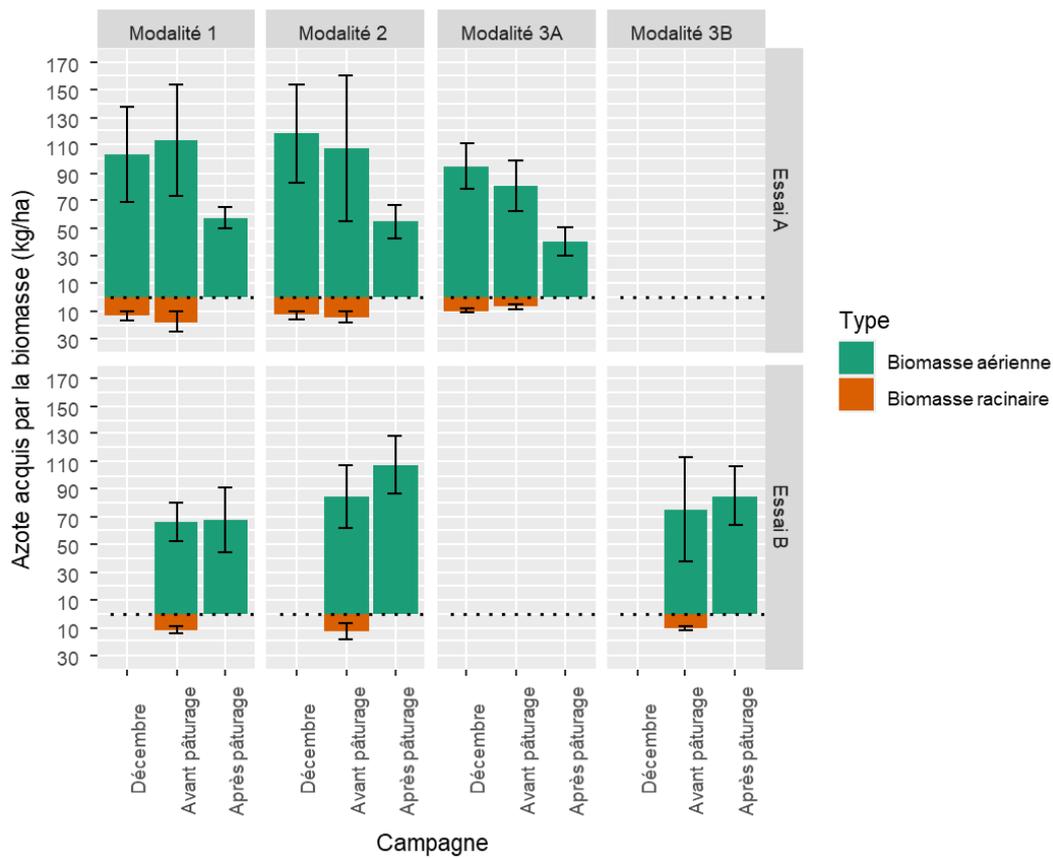


Figure 6 : Azote acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés

3.1.3.3. Acquisition de soufre par les couverts

La quantité de soufre acquise par les couverts est présentée dans la Figure 7. Nous observons que c'est plus de 15 kg S/ ha qui sont acquis par les couverts ce qui est conséquent. C'est cohérent avec la dominance de Brassicacées dans les mélanges qui acquièrent beaucoup de soufre, élément important dans le métabolisme secondaire de cette famille botanique. Nous observons un effet site qui s'explique par les types de pâturage notamment mais peu de différences entre modalités.

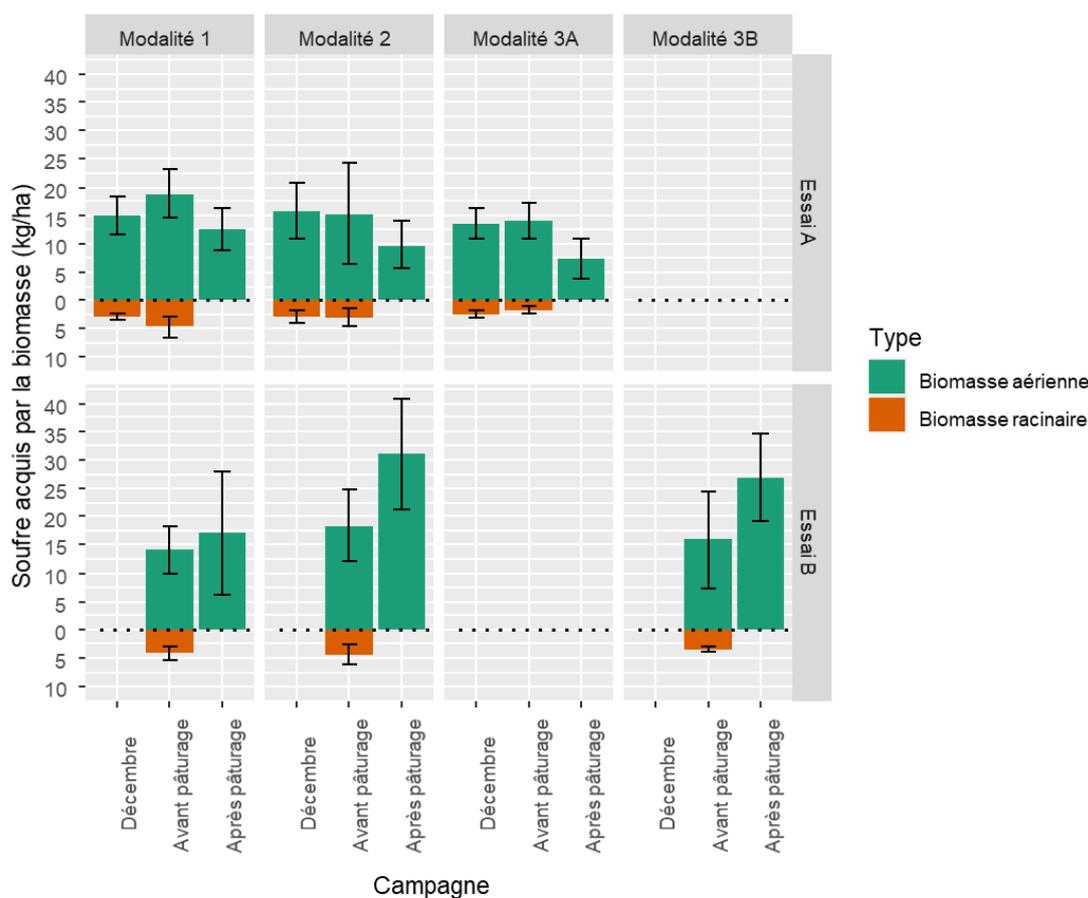


Figure 7 : Soufre acquis par modalité et par essai au cours du temps. Les intervalles de confiance sont représentés

3.1.4. Décomposition des résidus des couverts

Les parties aériennes restantes après pâturage étant broyées et restituées pour préparer le lit de semence, il est intéressant d'étudier l'impact de ces résidus sur la disponibilité de l'azote dans le sol. Le rapport C/N des parties aériennes après pâturage se situe entre 40,1 pour la modalité 1 de l'essai B et 47,4 pour la modalité 2 de l'essai A. Une ANOVA avec comme variable explicatives du modèle linéaire la modalité et le site expérimental a montré un effet significatif du site expérimental. En effet, les rapport C/N sur l'essai B sont plus faibles pour les modalités 1 et 2 que sur l'essai A. Cela peut s'expliquer par une consommation plus importante du couvert sur l'essai A où les vaches ont consommé surtout les feuilles et seules les cannes qui sont plus carbonées sont restées (*annexe G*). La Figure 8 montre que le processus de minéralisation des résidus immobilise de l'azote. En effet, le rapport C/N des résidus étant élevé, ce sont près de 75 kg N/ha qui sont immobilisés 28 jours après la destruction du couvert 2 sur le site B. La décomposition des résidus au cours du temps minéralise de l'azote et au bout de 168 jours, moins d'azote est immobilisé (12 à 37 kg/ha selon les modalités). Nous observons une diminution de l'écart d'azote immobilisé entre les modalités avec le temps.

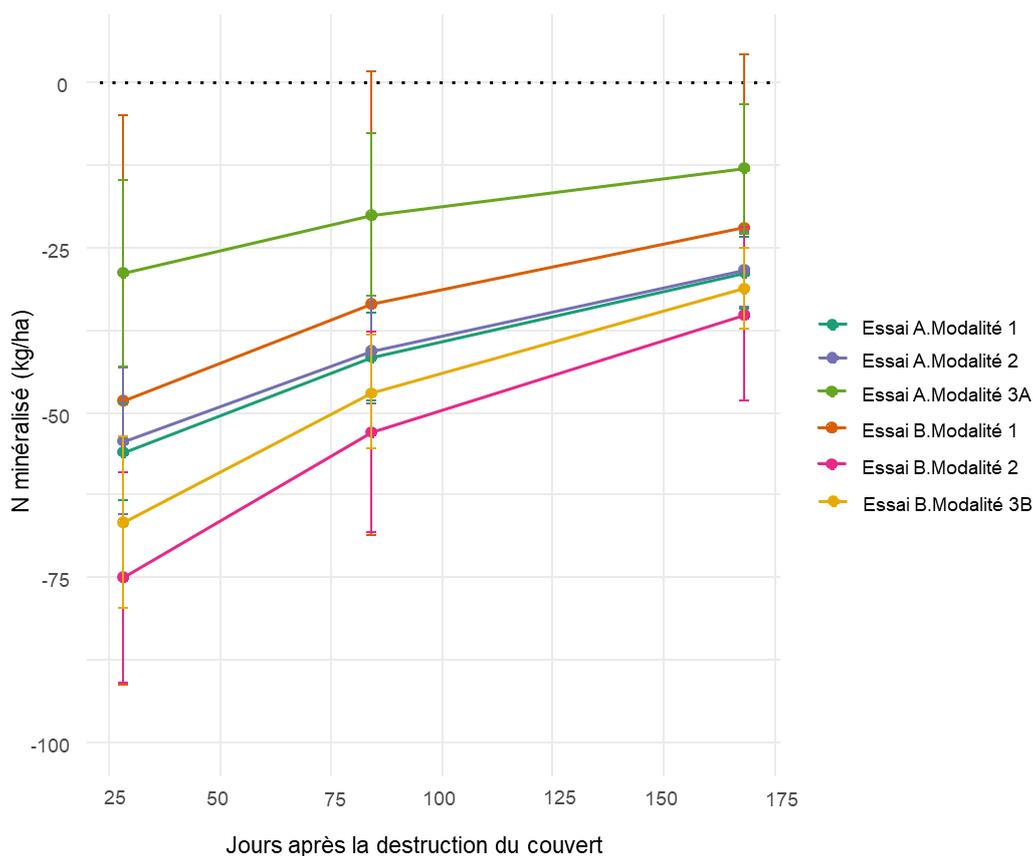


Figure 8 : Dynamique de minéralisation de l'azote des résidus des couvert selon les modalités et les sites

3.2. Analyse de l'influence du pâturage sur le sol

3.2.1. Influence du pâturage sur la fertilité physique du sol

Le principal frein au pâturage hivernal sur les parcelles est le risque de tassement du sol pour la plupart des agriculteurs. Nous avons donc mesuré de différentes manières l'influence du pâturage sur la fertilité physique du sol.

3.2.1.1. Influence du pâturage sur la porosité du sol

La Figure 9 compare la porosité du sol avant et après pâturage par modalité sur les 2 essais. Nous observons que la porosité totale diminue après pâturage sur l'essai A à 5 et 15 cm de profondeur excepté à 15cm de profondeur sur la modalité 3A. A l'opposé sur l'essai B, la porosité augmente après pâturage. Une ANOVA montre que l'effet du pâturage est significatif sur l'essai A et sur l'essai B. Cependant, il n'y pas d'influence significative de la modalité ou de la profondeur de prélèvement. Les résultats opposés sont cohérents avec le chargement de la parcelle, les observations faites au champ et la consommation du couvert sur chaque essai. En effet, l'essai A a été très piétiné par le troupeau de 75 vaches laitières alors que l'essai B n'a été que très peu exploré par les 11 vaches allaitantes. Pendant les 30 jours de pâturage de l'essai B, les couverts ont continué leur développement et nous pouvons faire l'hypothèse que le développement racinaire pendant cette période de forte croissance des cultures explique l'augmentation de la porosité du sol.

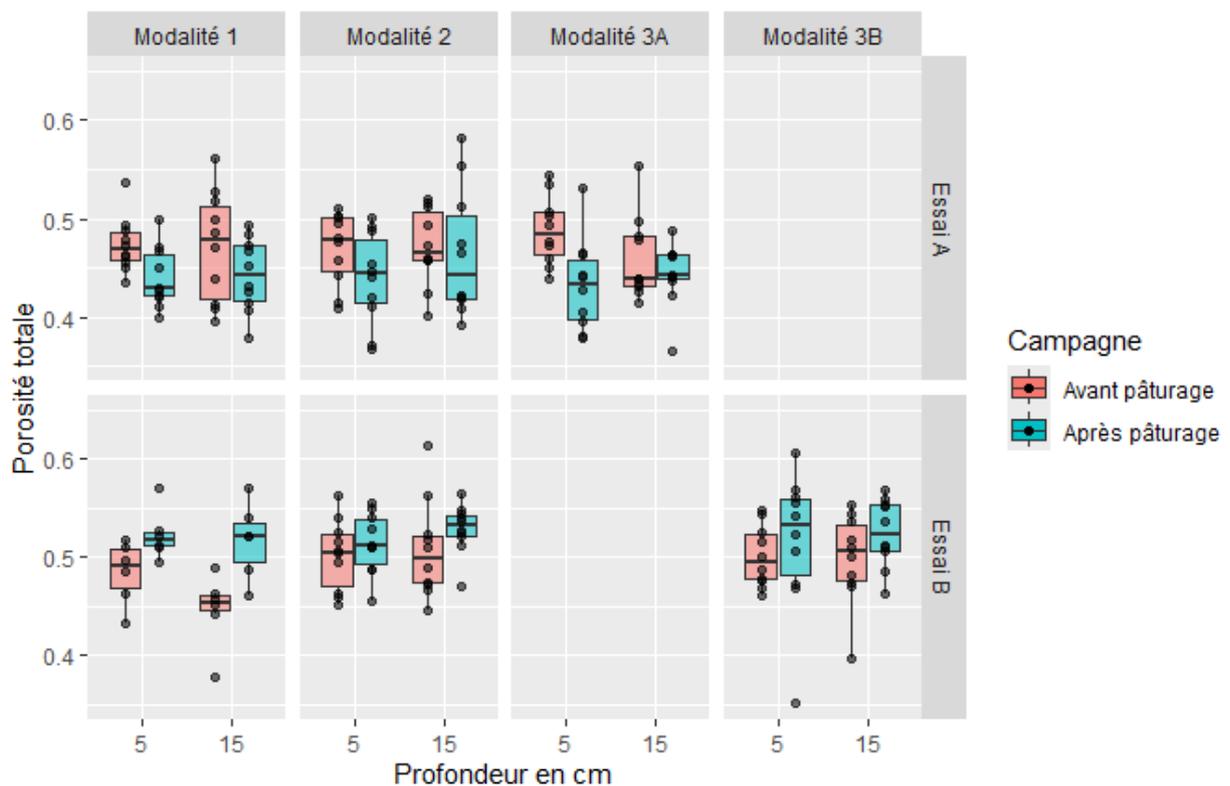


Figure 9 : Porosité du sol à 5 et 15 cm de profondeur en fonction des modalités, des campagnes de prélèvement et des sites expérimentaux

3.2.1.2. Influence du pâturage sur la structure et la stabilité structurale du sol

Les notes de structure du sol des tests VESS qui se font par horizon ont été transformées en note globale par échantillon par moyenne pondérée par la hauteur de l'horizon. La Figure 10 montre l'évolution de la structure du sol sur l'essai B. Nous observons une diminution de la note globale après pâturage sur les 3 modalités. L'effet du pâturage est significatif sur ces résultats (p -value < 0.05). La variabilité des notes est assez importante sur cette mesure et cela s'explique par l'hétérogénéité de la parcelle. La diminution de la note globale suggère une amélioration de la structure du sol c'est-à-dire des agrégats petits et qui se désagrègent facilement à la main. Dans les facteurs de notation de la structure, il y a un gradient de porosité du sol du plus poreux 1 au moins poreux 5 sur l'échelle de notation VESS (*annexe D1*). La présence de racine est aussi un facteur de notation du test VESS. Les notes 1 et 2 correspondent à un système racinaire très développé. Nous observons ici que cette diminution de la note globale est cohérente avec une augmentation de la porosité ce qui va dans le même sens que l'observation du paragraphe précédent. De plus, la notation tend à appuyer l'hypothèse du développement du système racinaire au cours du pâturage. Nous rappelons que les mesures n'ont pas été faites avant pâturage sur l'essai A.

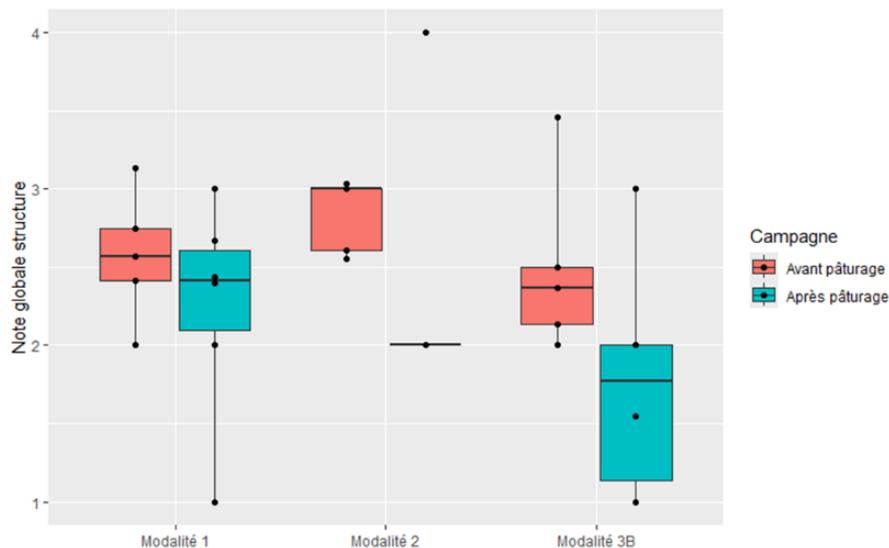


Figure 10 : Evolution de la note structurale du test VESS sur l'essai B

Les tests de stabilité structurelle permettent de déterminer la proportion massique de terre décrochée au cours du Slake test. L'ANOVA sur les échantillons saturés montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités et entre les campagnes de prélèvement. En revanche, le site expérimental a une influence significative. Les échantillons de l'essai B se désagrègent plus que ceux de l'essai A. Les échantillons séchés en revanche se désagrègent plus que les échantillons saturés de manière significative sur l'essai A contrairement à l'essai B où ils ont le même comportement que les échantillons saturés. Le sol de l'essai A est stable puisque que moins de 8% de la masse des échantillons saturés se d sagr ge. Sur l'essai B, c'est moins de 16% qui se d sagr ge ce qui reste stable comparé à d'autres sol de la région d'après le technicien qui a développé ce test.

3.2.1.3. Influence du pâturage sur la résistance à la pénétration du sol

Les mesures au pénétromètre de l'essai A ont été représentées sur la Figure 11. Nous observons globalement une augmentation de la pression nécessaire à la pénétration avec la profondeur. Nous observons une différence entre les mesures avant et après pâturage sur les 15 premiers cm environ. La pression nécessaire à la pénétration est plus élevée après qu'avant pâturage. Ce résultat va dans le même sens que les données de porosité du paragraphe 3.2.1.1. Il semble y avoir une compaction du sol sur les 15 premiers cm. Il n'y a pas de différence claire qui se dégage entre les différentes modalités testées. Il n'y a pas non plus de différences en dessous de 15 cm.

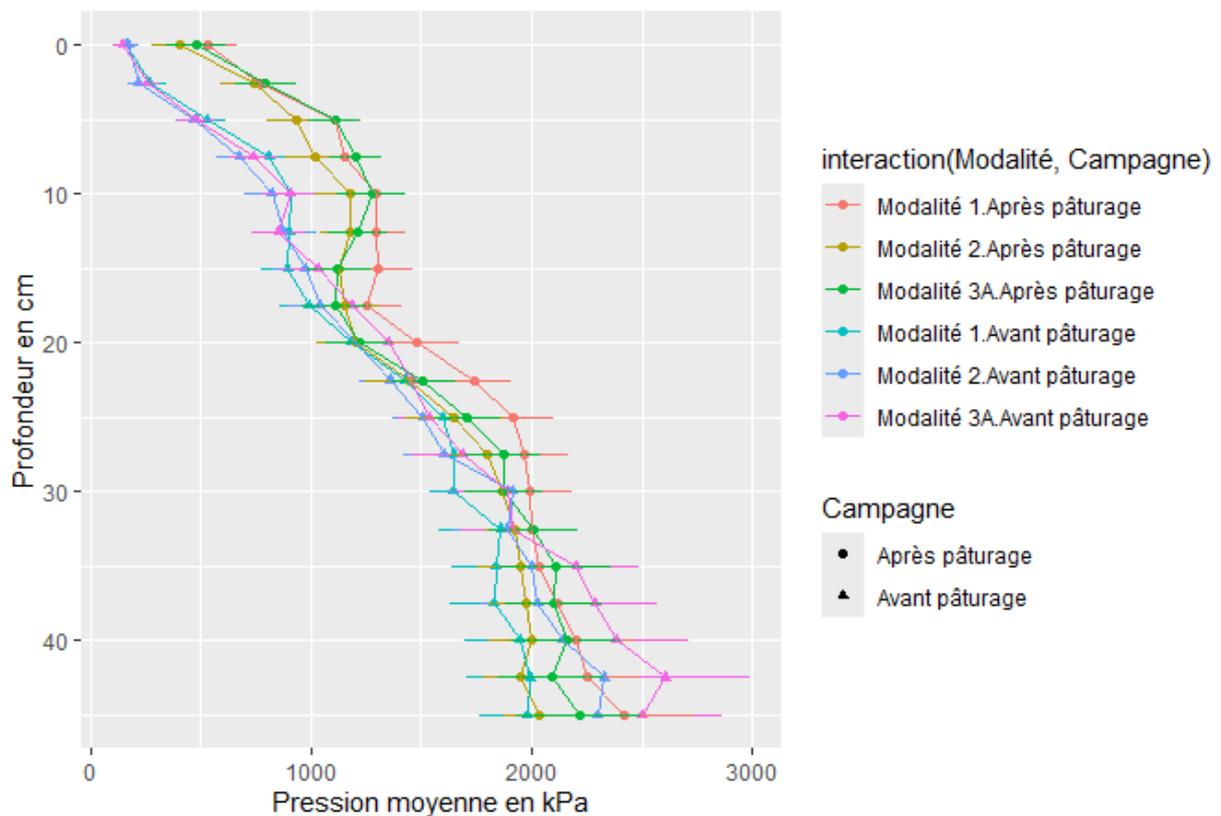


Figure 11: Diagramme de la pression nécessaire à la pénétration en fonction de la profondeur sur l'essai A. Les intervalles de confiance sont représentés

Les données de l'essai B après pâturage ne sont pas exploitables car les conditions de mesures étaient trop sèches. Nous observons néanmoins qu'il n'y a pas de différence entre les modalités dans la campagne de mesure avant pâturage.

3.2.2. Influence du pâturage sur la fertilité biologique du sol

Les déjections animales restituent de la matière organique sous forme de bouses et pissats dans notre cas d'étude. Cette matière organique pourrait avoir une influence sur l'activité biologique du sol. Nous avons donc étudié l'évolution de l'activité biologique du sol au cours du temps.

3.2.2.1. Influence du pâturage sur le carbone labile et la respiration des micro-organismes du sol

Les mesures de carbone labile du sol et de respiration basale sont représentées dans le

Tableau 6. Nous observons que le carbone labile a tendance à diminuer sur les modalités 2 et 3A de l'essai A. A l'inverse il a tendance à augmenter sur la modalité 1 sur les 2 essais et sur les modalités 2 et 3B de l'essai B. Cependant, il n'y a pas d'effet significatif de la modalité, du site expérimental ou du pâturage sur ce jeu de données regroupant les 2 essais. La respiration basale tend à augmenter sur les modalités 1 et 2 de l'essai A et à diminuer sur les modalités 3A de l'essai A et 1, 2 et 3B de l'essai B. Il y a un effet significatif du site expérimental sur le jeu de données concernant la respiration basale.

Modalité	Lieu	POXC av ± ic	POXC ap ± ic	Respi av ± ic	Respi ap ± ic
Modalité 1	Essai A	359,6 ± 205,5 a	358,9 ± 260,7 a	39,2 ± 19,5 a	55,1 ± 51,6 a
Modalité 1	Essai B	389,2 ± 53 a	465,2 ± 36,4 a	82,8 ± 8,9 b	57,1 ± 1,3 a
Modalité 2	Essai A	421,6 ± 158 a	339,4 ± 97,9 a	37,8 ± 19,4 a	49,4 ± 8,7 a
Modalité 2	Essai B	375,6 ± 20,2 a	402,2 ± 54,7 a	72,6 ± 10,8 ab	65,2 ± 24,2 a
Modalité 3A	Essai A	439,3 ± 268 a	312,3 ± 99 a	50,7 ± 18,4 ab	44 ± 8,8 a
Modalité 3B	Essai B	404 ± 63,5 a	432,7 ± 45,6 a	75,2 ± 25,6 ab	60,9 ± 10,7 a

Tableau 6: Carbone oxydable (POXC) en mgC/kg sol et respiration basale (Respi) en mgC-CO₂/kg sol/j selon les modalités, les campagnes (av : avant pâturage ; ap : après pâturage) et les essais. Les intervalles de confiance (ic) et tests de Tukey sont présentés

3.2.2.2. Influence du pâturage sur la présence des vers de terre

Le comptage de vers de terre avant pâturage sur l'essai A montre des différences entre les 3 modalités implantées. Le

Tableau 7 comptabilise les points de mesure en fonction du nombre de vers de terres observés. Ainsi, les comptages semblent montrer qu'il y a plus de vers de terre sur la modalité 2 que sur les modalités 1 et 3A. La modalité 3A semble attirer beaucoup moins les vers que les modalités 1 et 2. Le nombre de vers sur la modalité 1 est variable selon les points de mesure. Un test de Fisher a montré que les variables Modalité et nombre de vers de terre ne sont pas indépendantes.

Classes de nombre de vers de terre	0-10	10-25	25-35	35-50	50+
Modalité 1	1	2	2	1	1
Modalité 2	0	0	0	3	7
Modalité 3A	7	1	1	0	0

Tableau 7: Nombres de points de mesure par classe d'effectifs de vers de terre et par modalités sur l'essai A avant pâturage

3.3. Analyse globale des niveaux de performance des couverts pâturés

La Figure 12 synthétise les résultats précédents en présentant les performances des modalités en considérant certains services écosystémiques. 1 est le meilleur niveau de performance et 0 est le moins bon niveau de performance en relatif par rapport aux échantillons analysés. Nous observons un fort effet site notamment sur les services compaction du sol et quantité de fourrage. Nous observons également que la modalité 3A a un comportement très différent des 2 autres modalités de l'essai A. En particulier, elle a une mauvaise qualité fourragère. Cela peut s'expliquer par la présence de la moutarde dans cette modalité qui était en fin de cycle donc très ligneuse au moment du pâturage. Cependant, cette fin de cycle précoce permet au couvert 3A de minéraliser plus d'azote au moment du semis de la culture suivante puisque le processus de décomposition de la moutarde a commencé bien avant. La modalité 3A immobilise donc moins d'azote du sol pour la décomposition des résidus pendant la

culture suivante que les autres couverts. Les modalités 1 et 2 de l'essai A ont un comportement très proche car en réalité le colza est l'espèce largement majoritaire sur ces deux modalités. Nous observons également un contraste entre les fonctions utilisant des données récoltées avant pâturage (fonctions en rouge) et les fonctions représentant les données après pâturage (fonctions en bleu). Les couverts de l'essai A ont des niveaux de performance plus élevés avant pâturage et l'essai B est plus performant après pâturage notamment sur l'acquisition d'éléments. Cette tendance reflète une consommation des couverts plus importante sur l'essai A que sur l'essai B. Nous observons donc ici un compromis entre une consommation des couverts et la maximisation de la production de biomasse et donc d'acquisition d'éléments.

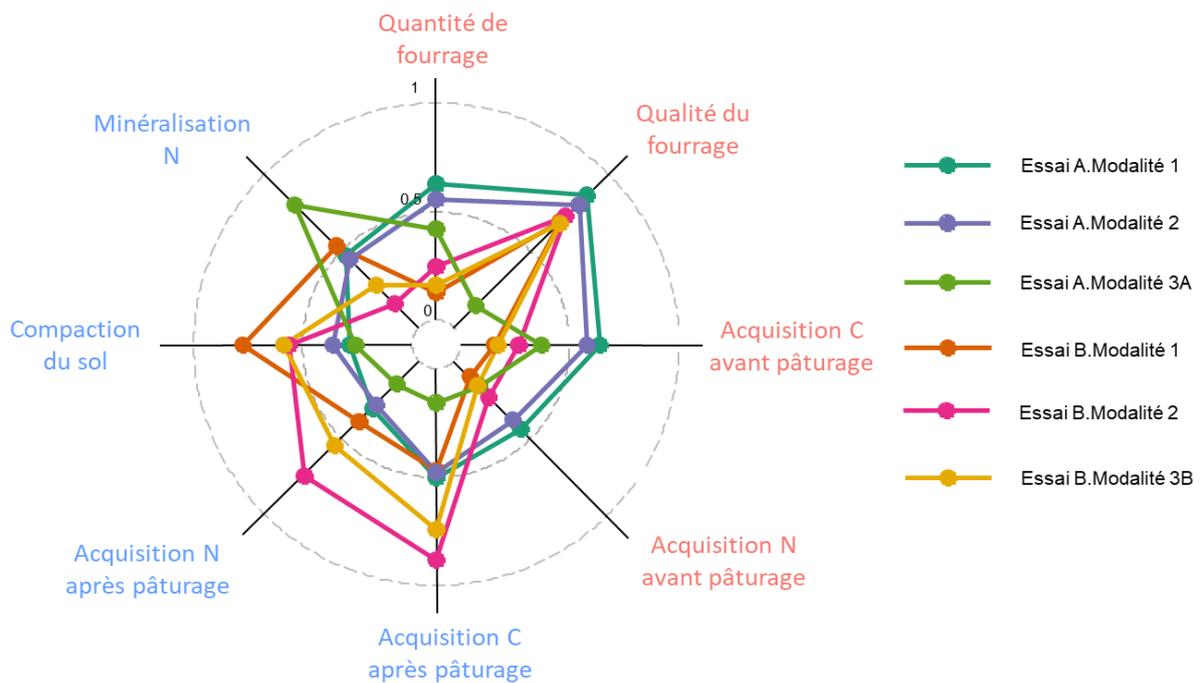


Figure 12 : Graphique radar des niveaux de performance des modalités sur les deux essais

4. Discussion

4.1. Quelques limites et recommandations sur l'acquisition des données et les calculs des indicateurs

4.1.1. Biomasses de couverts

Les 3 modalités de couverts étudiées ont produit des biomasses aériennes intéressantes d'un point de vue éleveur. En effet, la ressource fourragère de ces couverts a permis d'alimenter en sortie d'hiver un troupeau de 75 vaches laitières pendant 5 jours sur l'essai A. Dès le mois de décembre, ce sont 3.5 à 4 t MS/ha qui étaient disponibles au pâturage sur l'essai A. Cette quantité produite à l'automne est cohérente avec ce qu'observe la chambre d'agriculture d'Isère (2017) sur les couverts multi spécifiques et couverts Brassicacées : 3.3 t MS/ha et 3.2 t MS/ha respectivement avec une grande variabilité liée aux parcelles et itinéraires techniques notamment.

La prépondérance du colza observée dans toutes les modalités s'explique par une meilleure levée du colza (30 à 60 plantes/m²) par rapport aux autres espèces (moins de 20 plantes/m² pour les vesces). Terres Inovia précise que la densité optimale en fin de levée pour une culture de colza pure est de 20 à 35 plantes/m². Cette expérimentation est reconduite pour l'année 2024-2025 et la densité de semis du colza a été réduite à 2kg/ha après négociation avec les agriculteurs dans le but que toutes les espèces des modalités puissent s'exprimer. Par ailleurs, le protocole suivi comporte quelques biais et incertitudes. La biomasse aérienne est extrapolée à partir de 2 prélèvements de 0.5m² par parcelle. Il est donc difficile de capter toute la variabilité intra parcellaire. Les adventices étaient majoritairement du raygrass donc il était difficile de différencier les Poacées semées (orge, brome, seigle) des raygrass. C'est pourquoi les Poacées sont considérées comme un groupe. De même les deux espèces de vesces et de trèfles n'ont pas été différenciées lors des prélèvements. Un pâturage en début d'hiver aurait été possible car les couverts se sont bien développés à l'automne mais la pluviométrie de l'année ne l'a pas permis.

4.1.2. Valeur alimentaire

La qualité du fourrage produit a été satisfaisante pour les deux troupeaux. L'agriculteur de l'essai B est content de cette période de pâturage d'un mois environ. D'après lui, les vaches ont pris en masse et ont un beau poil. Les valeurs alimentaires calculées montrent aussi que le fourrage est riche et dense en énergie.

La valeur alimentaire des couverts a été déterminée à l'aide des équations de l'ouvrage *L'alimentation des ruminants* (INRAE, 2018). Ces équations sont déterminées de manière empirique sur un jeu de données issues d'expérimentations. Ces équations sont pour la plupart des régressions linéaire avec un coefficient de détermination linéaire de Pearson (R^2) parfois faible ($R^2=0.5$ pour l'équation permettant de calculer la variable PANDI (*annexe C2*). De plus, certaines équations utilisées sont valables pour des prairies ou associations graminées-légumineuses. Il n'y a pas d'équation valable pour des mélanges contenant des Brassicacées dans cet ouvrage. Nos couverts étant principalement composés de colza fourrager, les équations utilisées ne sont donc pas adaptées mais aucune référence bibliographique sur des couverts multi spécifiques à dominance Brassicacées n'a été identifiée. D'après les tables de l'ouvrage cité précédemment, le colza fourrager au stade début floraison a pour valeur alimentaire : UFL= 0.95 UF/kg MS, UFV=0.93 UF/kg MS, PDI=83 g/kg MS et BPR=10 g/kg MS. Les valeurs

des UF présentées en 3.1.2. semblent donc légèrement surestimées par nos calculs, les valeurs PDI sont cohérentes avec les données des tables et les valeurs BPR semblent sous-estimées même si les intervalles de confiance de ces variables sont importants. L'échantillonnage est également discutable puisque nous avons analysé la biomasse aérienne dans son ensemble alors qu'en réalité, les animaux ne consomment pas tous les organes dans les mêmes proportions. Nous avons observé que les vaches ne consomment pas les cannes de colza mais uniquement les feuilles et les bourgeons de fleurs (*annexe G*). La valeur alimentaire de ce qui a réellement été consommé est donc différente de la valeur calculée pour la biomasse aérienne totale. Nous observons d'ailleurs que l'azote et le soufre acquis par les parties aériennes sur l'essai A ont tendance à diminuer avec le pâturage alors qu'il y a la même quantité de carbone avant et après pâturage. Cela suggère que les organes consommés sont les organes tendre, riches en azote et soufre (feuilles et fleurs).

Nous avons calculé deux temps de pâturage en fonction des UFL et PDI disponibles et nous avons retenu le plus faible temps qui correspond donc au facteur limitant. Cependant, nous avons vu que l'estimation de ces valeurs est approximative et il pourrait y avoir d'autres facteurs limitant comme la toxicité du fourrage. En effet, les Brassicacées ont des teneurs élevées en nitrate qui peuvent être toxiques dans certains cas (Lenz et al., 2018). Cependant, les auteurs de cette étude n'ont pas observé de symptômes sur les animaux ayant consommé des niveaux considérés toxiques de nitrate. Les composés issus du métabolisme secondaire des Brassicacées comme les glucosinolates peuvent diminuer la croissance des animaux en réduisant la consommation de fourrage (Barry, 2013). Les temps de pâturage théoriques calculés ne sont pas comparables aux temps réels de pâturage car les allées en prairie à dominance Poacées ont été une source d'alimentation importante mais non quantifiée du troupeau. Enfin, la croissance des couverts pendant la période de pâturage n'a pas été prise en compte dans l'estimation du stock disponible. Or, nous avons vu en 3.1.1 que ce développement peut être conséquent en termes de biomasse produite.

Pour pallier à ces biais, il faudrait rapprocher les campagnes de prélèvement de la période de pâturage mais cela représente une contrainte organisationnelle pour l'équipe technique très importante, surtout dans le contexte de cette année où le pâturage a été reporté à plusieurs reprises. Les allées à dominance de Poacées vont être réduites au minimum pour l'année prochaine. Ces allées vont également être étudiées comme une modalité à part entière ce qui permettra de quantifier et comparer les services de ce couvert.

4.1.3. Acquisition et minéralisation des éléments

La quantification de l'acquisition de carbone et azote par le couvert est calculée à partir des données de biomasses et des mesures de taux de carbone, azote et soufre des parties aériennes et racinaires. Ces deux mesures ont-elles même leurs biais et incertitudes. La mesure des taux des éléments dans les parties racinaires peut être surestimée car malgré un nettoyage minutieux, de la terre peut rester collée aux racines.

Nous nous sommes intéressés au carbone acquis par les couverts pour évaluer le potentiel stockage de carbone dans le sol qui permet d'améliorer la quantité de carbone organique stocké dans le sol. Jian *et al.* (2020) ont montré que l'introduction de couverts dans la rotation permet d'augmenter le taux de carbone organique dans le sol de 15 % environ. Ce stockage de carbone dans le sol est corrélé positivement à la durée de croissance du couvert et négativement à l'érosion du sol. Dans la région

d'étude qui est sujette à des phénomènes d'érosion, cela devrait encourager les exploitant à implanter des couverts. Cette même méta-analyse a montré que les mélanges de couvert sont plus performants que les couverts en monoculture (souvent Poacées) pour stocker de carbone organique dans le sol. Dans notre cas, le couvert s'est développé pendant 7 à 8 mois ce qui a permis au couvert d'acquérir plus de 2500kg C/ha avant destruction sauf pour la modalité 3A. Seitz *et al.* (2023) estiment que les couverts en Allemagne stockent 2600 kg C/ha dont 500 kg C/ha environ dans la partie racinaire. Ces chiffres correspondent bien aux données de l'essai A. Les couverts de l'essai B ont acquis plus de carbone car ils se sont développés plus longtemps que prévu.

L'azote acquis par la biomasse totale des couverts est variable mais se situe majoritairement entre 60 et 150 kg N/ha. Finney *et al.* (2016) ont étudié l'acquisition d'azote par la biomasse aérienne de couverts. Les couverts plurispécifiques contenant du colza ont acquis entre 100 et 160 kg N/ha environ ce qui est proche des valeurs que nous avons calculées. En effet, l'azote des parties racinaires contribue faiblement à l'azote total acquis par la plante (moins de 25 kg N/ha).

Il y a beaucoup de résidus des couverts qui ont un rapport C/N élevé. Il y a donc une immobilisation de l'azote du sol pour minéraliser ces résidus. Il y a un délai pour que l'azote acquis par les couverts soit disponible pour la culture suivante. D'après Trinsoutrot *et al.* (2000), ce délai est au moins supérieur à 168 jours car uniquement les résidus ayant un C/N inférieur à 24 apportent de l'azote minéral avant ce délai. Cependant, la revue de B. Chen *et al.* (2014) précise que l'indicateur C/N n'est pas suffisant car la forme du carbone importe. Les taux de lignine et de polyphénol sont des indicateurs qui peuvent préciser la dynamique de décomposition des résidus. Les propriétés du sol importent également (N déjà disponible, pH). Dans notre cas, il y aura probablement une faim d'azote pendant la croissance de la culture de printemps puisque le couvert a été détruit tardivement (mi-avril sur l'essai A et début mai sur l'essai B). Le couvert a donc une influence importante sur la conduite de la culture suivante : gestion des résidus pour préparer le lit de semence, fertilisation azotée pour compenser l'immobilisation de l'azote par les résidus.

4.1.4. Compaction et structure du sol

La compaction du sol a pu être évalué par 3 indicateurs différents : la densité apparente du sol, la résistance du sol à la pénétration et la note de structure du test VESS. Ces indicateurs ont des avantages et inconvénients et dans notre étude ils renseignent la même fonction écosystémique. Il pourrait donc être envisagé de sélectionner l'indicateur le plus pertinent pour alléger le protocole de mesures qui est déjà assez lourd.

4.1.1.1. Densité apparente

La densité apparente évolue de manière opposée sur les essais A et B. Nous observons une compaction du sol sur l'essai A avec le pâturage et au contraire une décompaction sur l'essai B. Le chargement semble être la principale raison expliquant cette différence. L'étude de Blanco-Canqui *et al.* (2023) confirme que le pâturage peut compacter le sol dans les premiers centimètres mais cette compaction reste sous le seuil critique qui empêche la croissance racinaire de la culture suivante. De plus, le travail du sol avant le semis permet d'annuler cette compaction superficielle. La croissance du couvert peut aussi compenser la compaction liée au piétinement des animaux d'après la même étude et cette hypothèse semble la plus probable sur l'essai B. La mesure de la densité apparente se fait par

prélèvement d'un cylindre de 250 cm³ et cet échantillonnage peut biaiser le résultat notamment dans le terrain caillouteux comme sur l'essai B.

4.1.1.2. Résistance à la pénétration

La mesure de résistance à la pénétration se fait en condition humide mais dans un sol ressuyé. Ces conditions n'ont pas été réunies après pâturage sur l'essai B donc les données de cet essai n'ont pas pu être exploitées. De plus, cette mesure suppose qu'il n'y ait pas trop de cailloux sur les 45 premiers cm pour ne pas fausser la mesure. L'appareil de mesure est aussi assez sensible à la vitesse d'enfoncement dans le sol et la mesure est donc assez chronophage pour des données peu fiables. Dans notre cas, la compaction est un risque surtout sur les 10 premiers cm de profondeur (Blanco-Canqui *et al.*, 2023) donc l'information sur les horizons plus profonds n'est pas forcément nécessaire. Schomberg *et al.* (2014) ont observé une augmentation de la résistance du sol après le pâturage de leurs parcelles de couverts en condition de printemps très humide. Les conditions de cette étude sont proches de celles sur l'essai A : troupeau de 35-40 génisses de 300 kg et un pâturage du couvert (seigle) de moins de 10 jours au printemps en condition très humides. Cette compaction sur les parcelles pâturées est corrélée avec une baisse de rendement du coton qui est la culture principale comparativement aux parcelles non pâturées.

4.1.1.3. Note structurale du test VESS

Les tests VESS ont montré une évolution significative de structure de sol au cours du pâturage sur l'essai B. Les notes sont pour la grande majorité inférieures ou égales à 3 ce qui indique une bonne structure du sol et que le système de production fonctionne bien sur cette parcelle (Ball *et al.*, 2007). Des notes supérieures à 3 indiqueraient une mauvaise structure et une nécessité de changer les pratiques. Cependant, les résultats sont à prendre avec du recul puisque différentes personnes ont effectué les notations ce qui apporte un biais expérimentateur. De plus, les conditions de notation après pâturage sur l'essai B étaient assez sèches ce qui peut augmenter la friabilité des agrégats d'après la même étude de 2007. Cette mesure est visuelle et est plutôt utilisée dans le cadre de journées techniques et d'animation de groupes mais elle est très chronophage dans le cadre d'un projet de recherche. En effet, la nécessité de répéter les mesures pour avoir une puissance statistique minimale mobilise de nombreuses personnes sur un certain temps (10 à 15 minutes par notation sans compter la préparation des petites fosses préalables).

4.1.1.4. Stabilité structurale : Slake test

Les tests de stabilité structurale (Slake test) n'ont pas montré de différence significative entre les modalités. Ce résultat était attendu étant donné que les effets des couverts sur la stabilité structurale du sol sont plutôt sur le long terme (García-González *et al.*, 2018; Qi *et al.*, 2022). Nos données n'ont pas montré d'effet du pâturage non plus et cela est probablement dû au fait que le sol des essais a déjà une bonne stabilité structurale : moins de 16% de perte de masse au cours du Slake test alors qu'un échantillon peut perdre jusqu'à 80 % de sa masse dans certains cas (Vanwindekens & Hardy, 2023). Cela est cohérent aussi avec les notations de structure du test VESS qui sont inférieures à 3 pour presque toutes les parcelles.

La dynamique de la désagrégation des échantillons n'a pas pu être exploitée car la saturation en eau des échantillons préalablement au Slake test ne permet pas de saturer complètement les échantillons et ainsi, lors du test une partie de l'eau du contenant est absorbée par l'échantillon ce qui fausse la donnée de masse mesurée par la balance. Etant donné que très peu de sol se décroche de

l'échantillon, ce transfert d'eau couvre la perte de sol de l'échantillon. Le protocole a donc été amélioré en augmentant le temps d'aspersion des échantillons pour mieux saturer les échantillons. Une idée qui va être testée est aussi de diminuer la taille des échantillons prélevés ce qui permettrait d'augmenter le rapport surface/volume et donc de mieux saturer et potentiellement discriminer plus les échantillons. Vanwindekens & Hardy (2023) utilise des échantillons secs dans leur protocole qui est très similaire au nôtre. Le gain de masse par saturation des échantillons au cours du test est pris en compte en exprimant la masse de l'échantillon de manière relative à la masse maximum de l'échantillon qui se trouve au moment de saturation au début du test. Nous avons pensé à utiliser la même façon d'interpréter les données mais nos échantillons ne perdent pas de masse au cours du temps et donc la saturation de l'échantillons lors des premiers cycles d'immersion correspond à la valeur finale du test. Nos balances sont assez peu précises car elles doivent accepter une masse de 4000g environ. La masse de terre décrochée varie entre 0 et 100g avec des balances précises à 2g. Des balances plus précises seront installées à l'avenir pour affiner les données. Enfin, un seul échantillon a été prélevé par parcelle par campagne car le Slake test est très chronophage (4 échantillons par jour sont analysés au laboratoire) ce qui limite la puissance statistique. Des échantillons plus petits permettraient de prélever plus de répétitions et d'analyser aussi plus rapidement au laboratoire.

4.1.5. Fertilité biologique

4.1.5.1. Données POXC et respiration basale

Les données de POXC et respiration basale n'ont pas mis en évidence de différences entre modalités ou d'effet pâturage. Par contre un effet site a été visible sur la mesure de la respiration basale. Les intervalles de confiance sont assez importants du fait du faible nombre de mesure (3 mesures par modalité et par campagne sur l'essai A). Le coût d'analyse des échantillons étant très élevé, le nombre d'échantillons analysés a été réduit. Les conditions de stockage et transport des échantillons peuvent avoir influé sur le résultat. En effet, les échantillons doivent être conservé au frais et analysé sous 7 j d'après le laboratoire. Les échantillons ont été prélevés entre 10 et 20 cm de profondeur, en accord avec le protocole choisi dans le cadre du programme CASDAR INTER-AGIT+. Cependant, l'évolution du carbone disponible à la minéralisation serait cantonné plus en surface dans un contexte de non travail du sol (Franzluebbers & Stuedemann, 2008). Il aurait été intéressant d'analyser les échantillons de 0 à 10 cm de profondeur mais cela aurait été difficile à prélever sans déjection animale ni biomasse aérienne du couvert. L'évolution de carbone labile et d'activité des microorganismes n'est peut-être pas immédiate. Il serait intéressant de répéter cette pratique du pâturage de couverts sur plusieurs années sur la même parcelle. Wang *et al.* (2017) ont montré qu'un couvert de radis fourrager permet d'augmenter le carbone labile et la quantité de carbone totale en surface. Enfin, l'utilisation du terme carbone labile n'est pas exacte puisque Woodings & Margenot (2023) ont montré que le carbone de la lignine est oxydable alors que celui du glucose l'est beaucoup moins. Ainsi, cette mesure POXC est à prendre avec du recul (Tirol-Padre & Ladha, 2004). Le protocole utilisé quantifie l'activité biologique du sol dans des conditions d'humidité et de température optimales (Les tutoriels du Pecnot'Lab, 2023). Le facteur limitant est donc le carbone minéralisable.

4.1.5.2. Comptage des vers de terre

Les comptages de vers ont montré un fort effet site. L'essai A contient plus de vers que l'essai B. Il s'agit peut-être d'un effet météorologique aussi. Les données sont partielles et peu précises du fait des contraintes météorologiques et de temps. En effet, un comptage de vers en déterminant le nombre et

les espèces précisément est très chronophage, c'est pourquoi les mesures sont faites par fourchettes de nombre. Le comptage se fait en même temps que le test-bêche qui prend une bêche de 40 cm de profondeur sur une dizaine de cm d'épaisseur mais le volume de terre prélevé n'est pas précis. Certains comptages n'ont pas été faits car la parcelle était trop humide. Les résultats montrent que la modalité 2 contient beaucoup plus de vers que les autres. Cette modalité contient des Fabacées (féverole d'hiver et 2 espèces de vesce) qui produisent une matière organique riche en azote et qui donc attire plus de vers de terre que les autres familles botaniques (Roarty *et al.*, 2017). La féverole est présente uniquement dans cette modalité et c'est la Fabacée la plus présente en termes de biomasse (les trèfles implantés dans les modalités 1 et 3A étant très peu développés). De plus, le système racinaire des féveroles est plus développé que les autres légumineuses d'après nos observations lors de prélèvements de plantes entières. Schmidt *et al.* (2003) ont montré qu'un couvert de trèfles augmente la population de vers de terre par rapport à une gestion sans couvert. Nous pouvons donc supposer que la féverole de la modalité 2 favorise la présence de vers de terre sur l'essai A. Cependant, cette tendance n'est pas observée sur l'essai B car moins de 10 vers ont été observés sur presque la totalité des points de mesure. La modalité 3A contient de la moutarde en forte proportion avant pâturage (environ 40% de la biomasse racinaire) qui pourrait être répulsif pour les vers de terre. Le

Tableau 7 montre que peu de vers sont présents dans cette modalité. C'est aussi ce qui a été observé par Roarty *et al.* (2017). La moutarde est utilisée dans les protocoles des études spécifiques sur les vers de terre donc les résultats obtenus semblent montrer que la décomposition de la moutarde sur la parcelle fait fuir les vers de terre également. Une hypothèse est que lors de la décomposition, les molécules du métabolisme secondaire de la moutarde qui sont répulsives pour les vers percolent dans le sol avec les pluies de l'hiver et du printemps. Cependant, la littérature ne montre pas d'effet de biofumigation des Brassicacées par rapport aux Poacées et Hydrophyllacées dans le cas de plantes séchées (Valckx *et al.*, 2011).

4.1.6. Analyse globale des couverts et perspectives

L'analyse globale a pour objectif de synthétiser les informations des indicateurs présentés auparavant pour avoir une comparaison des performances des modalités-sites selon les fonctions écosystémiques étudiées. La Figure 12 représente la performance moyenne des modalités-sites mais il y a en réalité une variabilité non représentée. La première hypothèse de cette étude est au moins partiellement validée puisque les couverts ont fourni un fourrage conséquent et de qualité. L'effet piège à nitrate est difficile à quantifier mais au vu de la vitesse de croissance des couverts à l'automne et de la quantité d'azote acquis, cette fonction écosystémique est en partie fournie par les couverts. Pour être plus précis sur cette fonction, nous aurions pu mobiliser le modèle STICS pour estimer la lixiviation et la minéralisation de l'azote du sol pendant l'hiver et ainsi mieux renseigner l'effet CIPAN. Cela n'a pas été fait par manque de temps. L'effet sur l'érosion physique est également dur à quantifier. L'année prochaine, une vitrine sur une parcelle en pente avec différents couverts et un accès à l'irrigation permettra d'illustrer l'action des couverts sur l'érosion hydrique lors de journées techniques. L'essai A a confirmé qu'un fort chargement de la parcelle compacte le sol en surface. Cependant, en conditions moins humides, il n'est pas certain que cette compaction soit visible. L'importance relative des fonctions écosystémiques est très dépendante du contexte local et des objectifs de l'agriculteur. En effet, la compaction du sol peut représenter un frein important sur une exploitation en ACS alors que ce n'est pas un problème lorsqu'il y a un travail du sol avant le semis.

L'implantation de couverts et le pâturage n'a pas de conséquences que sur la parcelle mais également à l'échelle de l'exploitation. Nous ne nous sommes pas intéressés aux aspects économiques dans cette étude mais une étude menée aux Etats-Unis tend à montrer qu'à l'échelle de l'exploitation, le pâturage de couvert peut être intéressant économiquement (Drewnoski *et al.*, 2018). Cette étude soulève quelques limites au développement de cette pratique comme le calendrier de travail avec des fenêtres parfois courtes, des compétences de gestion du pâturage pas forcément présentes sur l'exploitation, des risques d'enherbement si le couvert ne se développe pas bien ce qui est une problématique récurrente (Wayman *et al.*, 2017). Dans notre cas, le pâturage très tardif a mené à une destruction complète fin avril et donc des résidus sont présent pour le semis de printemps. Le calendrier peut donc être complexe à gérer.

Les modalités 1 et 2 sur l'essai A apparaissent meilleurs que la modalité 3A sauf sur l'aspect minéralisation du couvert. Sur l'essai B, les 3 modalités ont un comportement proche. La modalité 1 n'a pas été implantée sur les blocs 4 et 5 à cause d'un problème au moment du semis, or les blocs 4 et 5 sont ceux qui ont produit le plus de biomasse car proches de la rivière avec un sol moins caillouteux. Les faibles différences entre les modalités soulignent le fait que la biomasse produite est le déterminant principal du niveau de performance des couverts. En effet, la biomasse intervient dans le calcul de 6 indicateurs sur les 8 représentés en Figure 12. Ce constat questionne aussi la recherche de couverts multi spécifiques avec des familles botaniques complémentaires. Puisque la biomasse produite apparaît comme le déterminant principal, un couvert monospécifique produisant une biomasse importante pourrait être aussi performant. Cependant, nous avons observé que la multi spécificité reste intéressante d'un point de vue de la résilience du couvert. Sur les zones très hydromorphes sur l'essai A, le colza ne s'est pas développé, les Poacées ont compensé en se développant plus.

Le pâturage n'a pas permis de détruire le couvert donc des opérations culturales ont été nécessaires pour détruire le couvert et préparer le lit de semence pour la culture suivante. Sur l'essai A, trois passages de déchaumeur dont le dernier combiné au semoir et 2 roulages ont été nécessaires pour la destruction du couvert et le semis de la culture suivante. Sur l'essai B, un passage de broyeur, un passage de déchaumeur à dents et un passage d'herse rotative ont été nécessaires pour préparer le lit de semence. Ces opérations culturales représentent du temps de travail et utilisent du carburant qui produit des gaz à effet de serre. Ainsi, il serait intéressant de pousser la réflexion sur le bilan carbone du pâturage de couvert.

4.2. Observations et ressentis des collaborateurs

Les agriculteurs partenaires qui ont mis à disposition leurs parcelles pour les essais sont satisfaits des services apportés par les couverts. L'essai A a permis d'alimenter le troupeau de 75 vaches laitières pendant presque 1 semaine. La compaction observée n'a pas été un problème puisqu'un travail superficiel du sol pour enfouir les résidus des couverts a été réalisé. L'essai B n'a pas été une source d'alimentation importante pour le troupeau mais le développement très important du colza fourrager qui a atteint plus de 2m par endroit a joué le rôle d'abris pour les bovins. En effet, nous avons observé des ronds dans les parcelles qui sont en fait des emplacements de rumination pendant l'après-midi quand il y a du soleil et du vent particulièrement. Cette recherche d'endroit abrité est d'autant plus forte qu'il s'agit de vache à robe sombre (Angus) à dire d'expert de l'IDELE. Cette fonction n'était pas attendue car il n'était pas prévu que le colza se développe autant. Il est également à noter que les troupeaux consommaient pour la première fois du colza fourrager ce qui peut expliquer une certaine

réticence au début à consommer les couverts. En effet, après une période d'adaptation de 1 semaine sur l'essai B, les vaches exploraient plus le couvert. Il y a donc une question d'habitude à la consommation de couvert.

Comme montré en 2.1., l'année a été particulièrement pluvieuse ce qui a contraint le planning de l'expérimentation. Le pâturage d'hiver prévu en décembre n'a pas pu être fait et les couverts se sont développés beaucoup plus que prévu. Par ailleurs, le développement très conséquent des couverts sur l'essai B a mené à une transpiration importante au printemps dans un contexte chaud et venteux. Cela a asséché les premières dizaines de cm de sol. C'est ce que nous avons observé lors des prélèvements de sol après pâturage. Les résultats de cette première année seront donc intéressants à comparer à ceux de l'année 2024-2025 si la météorologie est plus classique.

A propos des mesures effectuées, les données de résistance à la pénétration sont peu utiles et redondantes avec les données de densité apparente dans cette étude. La pertinence de cette mesure est donc à questionner dans le cadre d'une équipe technique en sous-effectif et avec un emploi du temps déjà chargé. De manière plus large, les données à propos du sol évoluent sur le long terme donc il n'est pas étonnant de voir peu de résultats lors de la première année d'expérimentation. Il serait intéressant de poursuivre l'étude sur les mêmes parcelles pour avoir un suivi pluriannuel notamment sur la fertilité biologique, la structure et la stabilité structurale, la compaction.

5. Conclusion

Cette étude qui visait à analyser les niveaux de services rendus par les couverts et leur pâturage a d'abord confirmé que l'implantation de couverts dans une exploitation de polyculture-élevage peut fournir un fourrage conséquent et de qualité à l'hiver et au printemps. Il a été montré que le développement des couverts à l'automne et début d'hiver permet de piéger de l'azote et d'acquérir du carbone et du soufre. Ces fonctions correspondent aux effets CIPAN et de stockage de carbone couramment recherchées lors de l'implantation de couverts. Le pâturage vient ensuite valoriser cette biomasse au sein de l'exploitation agricole sans détruire totalement le couvert. Ainsi, cette pratique peut contribuer à l'autonomie fourragère de l'exploitation. Peu de différences ont été observées entre les différents couverts semés. Cependant, la présence de moutarde semble réduire la qualité fourragère. La moutarde se décompose plus précocement en raison de son cycle plus rapide que les autres espèces implantées. Un fort effet site a également été observé ce qui souligne le fait que les chiffres et résultats de cette étude ne sont pas extrapolables dans d'autres contextes pédologiques et avec des troupeaux différents. Nous avons étudié deux cas très contrastés de pâturage ce qui n'est pas représentatif des exploitations du Nord-Comminges.

Les disservices identifiés dans cette étude sont la compaction du sol et l'immobilisation de l'azote du sol par les résidus du couvert. La compaction du sol reste limitée aux 15 premiers cm mais elle peut être évitée par une gestion de la période de pâturage et du chargement de la parcelle. L'immobilisation de l'azote par les résidus peut être limitée en détruisant plus tôt le couvert mais il y aura donc une plus faible acquisition de carbone.

Enfin, les résultats de cette première année d'expérimentation de pâturage de couverts en Nord-Comminges sont à considérer dans le contexte d'une saison particulièrement pluvieuse. La seconde année d'expérimentation avec les mêmes troupeaux et sur des parcelles proches de celles utilisées dans cette étude viendra compléter les résultats présentés ici.

Bibliographie

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530-2543.
- Anderson, L. K., Blanco-Canqui, H., Drewnoski, M. E., MacDonald, J. C., Carlson, Z., Hansen, B. H., Brinton, M. M., Ulmer, K. M., & Calus, K. J. (2022). Cover crop grazing impacts on soil properties and crop yields under irrigated no-till corn–soybean management. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 118-133.
- Arnauld de Sartre, X., Charbonneau, M., & Charrier, O. (2019). How ecosystem services and agroecology are greening French agriculture through its reterritorialization. *Ecology and Society*, 24(2).
- Assmann, J. M., Anghinoni, I., Martins, A. P., Costa, S. E. V. G. de A., Cecagno, D., Carlos, F. S., & Carvalho, P. C. de F. (2014). Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 52-59.
- Ball, B. C., Batey, T., & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23(4), 329-337.
- Ballot, R. (2022). Evolution des surfaces de couverts végétaux en France : État des lieux statistique. *Agronomie Environnement et Sociétés*, 12(1).
- Barry, T. N. (2013). The feeding value of forage brassica plants for grazing ruminant livestock. *Animal Feed Science and Technology*, 181(1), 15-25.
- Bell, L. W., Kirkegaard, J. A., Swan, A., Hunt, J. R., Huth, N. I., & Fettell, N. A. (2011). Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil and Tillage Research*, 113(1), 19-29.
- Bergtold, J. S., Ramsey, S., Maddy, L., & Williams, J. R. (2019). A review of economic considerations for cover crops as a conservation practice. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 34(1), 62-76.
- Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., de Oliveira, T., & Roger-Estrade, J. (2015). Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 553-567.
- Blanco-Canqui, H. (2022). Cover crops and carbon sequestration : Lessons from U.S. studies. *Soil Science Society of America Journal*, 86(3), 501-519.
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties : A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576.
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S. J., Holman, J. D., Creech, C. F., & Obour, A. K. (2022). Can cover crops improve soil ecosystem services in water-limited environments? A review. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 1-18.

- Blanco-Canqui, H., Wilke, K., Holman, J., Creech, C. F., Obour, A. K., & Anderson, L. (2023). Grazing cover crops : How does it influence soils and crops? *Agronomy Journal*, 115(6), 2801-2828.
- Carvalho, P. C. de F., Peterson, C. A., Nunes, P. A. de A., Martins, A. P., de Souza Filho, W., Bertolazi, V. T., Kunrath, T. R., de Moraes, A., & Anghinoni, I. (2018). Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems : Toward sustainable intensification. *Journal of Animal Science*, 96(8), 3513-3525.
- Chapagain, T., Lee, E. A., & Raizada, M. N. (2020). The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. *Sustainability*, 12(5), Art. 5.
- Chen, B., Liu, E., Tian, Q., Yan, C., & Zhang, Y. (2014). Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 429-442.
- Chen, G., & Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 117, 17-27.
- Claveirole, C. (2016). *La transition agroécologique : Défis et enjeux*.
- Couëdel, A., Alletto, L., & Justes, É. (2018). Crucifer-legume cover crop mixtures provide effective sulphate catch crop and sulphur green manure services. *Plant and Soil*, 426(1), 61-76.
- Couedel, A., Alletto, L., Tribouillois, H., & Justes, E. (2018). Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT*, 254, 50-59.
- Crespo, C., Wyngaard, N., Sainz Rozas, H., Barbagelata, P., Barraco, M., Gudelj, V., & Barbieri, P. (2021). Improving soil organic nitrogen and sulfur pools by cover cropping and crop fertilization in soybean-based cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 213, 105138.
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L. E., Franzluebbbers, A. J., Glover, J. D., Grandy, A. S., Lee, J., Six, J., Maul, J. E., Mirsky, S. B., Spargo, J. T., & Wander, M. M. (2012). Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494-504.
- Decker, H., Gamble, A., Balkcom, K., Johnson, A., & Hull, N. (2022). Cover crop monocultures and mixtures affect soil health indicators and crop yield in the southeast United States. *Soil Science Society of America Journal*, 86(5), 1312-1326.
- Drewnoski, M., Parsons, J., Blanco, H., Redfearn, D., Hales, K., & MacDonald, J. (2018). Forages and pastures symposium : Cover crops in livestock production: whole-system approach. Can cover crops pull double duty: conservation and profitable forage production in the Midwestern United States? *Journal of Animal Science*, 96(8), 3503-3512.
- Finney, D. M., Buyer, J. S., & Kaye, J. P. (2017). Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(4), 361-373.

- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. *Agronomy Journal*, 108(1), 39-52.
- Franzluebbers, A. J., & Stuedemann, J. A. (2008). Early Response of Soil Organic Fractions to Tillage and Integrated Crop–Livestock Production. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 613-625.
- Franzluebbers, A. J., & Stuedemann, J. A. (2015). Does grazing of cover crops impact biologically active soil carbon and nitrogen fractions under inversion or no tillage management? *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 365-373.
- Garba, I. I., Bell, L. W., Chauhan, B. S., & Williams, A. (2024). Optimizing ecosystem function multifunctionality with cover crops for improved agronomic and environmental outcomes in dryland cropping systems. *Agricultural Systems*, 214, 103821.
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M. (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81-88.
- Hao, X., Abou Najm, M., Steenwerth, K. L., Nocco, M. A., Basset, C., & Daccache, A. (2023). Are there universal soil responses to cover cropping? A systematic review. *Science of The Total Environment*, 861, 160600.
- Hazard, L., Magrini, M.-B., & Martin, G. (2017). *Transition agroécologique : Définition*. INRAE.
- Hu, Z. (2020). What Socio-Economic and Political Factors Lead to Global Pesticide Dependence? A Critical Review from a Social Science Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), Art. 21.
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (2018). *Handbook of Soil Sciences (Two Volume Set)*. CRC Press.
- INRAE. (2018). *Alimentation des ruminants* (Quae).
- Jane Barker, S., Tagu, D., & Delp, G. (1998). Regulation of Root and Fungal Morphogenesis in Mycorrhizal Symbioses1. *Plant Physiology*, 116(4), 1201-1207.
- Jian, J., Du, X., Reiter, M. S., & Stewart, R. D. (2020). A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107735.
- Justes, E., Mary, B., & Nicolardot, B. (2009). Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil : Parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil*, 325(1), 171-185.
- Justes, E., & Richard, G. (2017). Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. *Innovations Agronomiques*.
- Kaczmarek, J., & Gondko, R. (1986). Automated determination of sulphur in organic compounds. *Microchimica Acta*, 90(3), 235-250.

- Kelly, C., Schipanski, M. E., Tucker, A., Trujillo, W., Holman, J. D., Obour, A. K., Johnson, S. K., Brummer, J. E., Haag, L., & Fonte, S. J. (2021). Dryland cover crop soil health benefits are maintained with grazing in the U.S. High and Central Plains. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107358.
- Ladha, J. K., Peoples, M. B., Reddy, P. M., Biswas, J. C., Bennett, A., Jat, M. L., & Krupnik, T. J. (2022). Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research*, 283, 108541.
- Lamichhane, J. R., & Alletto, L. (2022). Ecosystem services of cover crops : A research roadmap. *Trends in Plant Science*, 27(8), 758-768.
- Lee, M. A. (2018). A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments. *Journal of Plant Research*, 131(4), 641-654.
- Lenz, M., Kern, R., & Drewnoski, M. (2018). 410 Nitrate Concentrations of Annual Forages Grown for Grazing in Nebraska. *Journal of Animal Science*, 96(suppl_3), 196-197.
- Pella, E., & Colombo, B. (1973). Study of carbon, hydrogen and nitrogen determination by combustion-gas chromatography. *Microchimica Acta*, 61(5), 697-719.
- Peng, Y., Wang, L., Jacinthe, P.-A., & Ren, W. (2024). Global synthesis of cover crop impacts on main crop yield. *Field Crops Research*, 310, 109343.
- Phelan, P., Moloney, A. P., McGeough, E. J., Humphreys, J., Bertilsson, J., O'Riordan, E. G., & O'Kiely, P. (2015). Forage Legumes for Grazing and Conserving in Ruminant Production Systems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(1-3), 281-326.
- Qi, J., Jensen, J. L., Christensen, B. T., & Munkholm, L. J. (2022). Soil structural stability following decades of straw incorporation and use of ryegrass cover crops. *Geoderma*, 406, 115463.
- Roarty, S., Hackett, R. A., & Schmidt, O. (2017). Earthworm populations in twelve cover crop and weed management combinations. *Applied Soil Ecology*, 114, 142-151.
- Ruis, S. J., Blanco-Canqui, H., Creech, C. F., Koehler-Cole, K., Elmore, R. W., & Francis, C. A. (2019). Cover Crop Biomass Production in Temperate Agroecozones. *Agronomy Journal*, 111(4), 1535-1551.
- Sauvant, D., Cantalapiedra-Hijar, G., Nozière, P., Berthelot, V., Chapitre, P. F., Faverdin, P., Delagarde, R., Boudon, A., & Delaby, L. (2020). *POUR EN SAVOIR PLUS DANS INRA 2018* :
- Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production—Invited paper. *European Journal of Agronomy*, 14(2), 81-111.
- Schipanski, M. E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., Kemanian, A. R., Mortensen, D. A., Ryan, M. R., Tooker, J., & White, C. (2014). A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 125, 12-22.

- Schmidt, O., Clements, R. O., & Donaldson, G. (2003). Why do cereal–legume intercrops support large earthworm populations? *Applied Soil Ecology*, 22(2), 181-190.
- Schomberg, H. H., Fisher, D. S., Reeves, D. W., Endale, D. M., Raper, R. L., Jayaratne, K. S. U., Gamble, G. R., & Jenkins, M. B. (2014). Grazing Winter Rye Cover Crop in a Cotton No-Till System : Yield and Economics. *AGRONOMY JOURNAL*, 106(3), 1041-1050.
- Seitz, D., Fischer, L. M., Dechow, R., Wiesmeier, M., & Don, A. (2023). The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant and Soil*, 488(1), 157-173.
- Siri-Prieto, G., Reeves, D. W., & Raper, R. L. (2007). Tillage systems for a cotton–peanut rotation with winter-annual grazing : Impacts on soil carbon, nitrogen and physical properties. *Soil and Tillage Research*, 96(1), 260-268.
- Sun, X. Z., Waghorn, G. C., Hoskin, S. O., Harrison, S. J., Muetzel, S., & Pacheco, D. (2012). Methane emissions from sheep fed fresh brassicas (*Brassica* spp.) compared to perennial ryegrass (*Lolium perenne*). *Animal Feed Science and Technology*, 176(1), 107-116.
- Thomsen, I. K., & Hansen, E. M. (2014). Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre- and postharvest sowing and time of incorporation. *Soil Use and Management*, 30(1), 48-57.
- Tirol-Padre, A., & Ladha, J. K. (2004). Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 68(3), 969-978.
- Tisdale, S. L. (1977). *Sulphur in forage quality and ruminant nutrition*.
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chèneby, D., & Nicolardot, B. (2000). Biochemical Quality of Crop Residues and Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics under Nonlimiting Nitrogen Conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 918-926.
- Udara Willhelm Abeydeera, L. H., Wadu Mesthrige, J., & Samarasinghalage, T. I. (2019). Global Research on Carbon Emissions : A Scientometric Review. *Sustainability*, 11(14), Art. 14.
- Valckx, J., Cordon Pina, A., Govers, G., Hermy, M., & Muys, B. (2011). Food and habitat preferences of the earthworm *Lumbricus terrestris* L. for cover crops. *PEDOBIOLOGIA*, 54, S139-S144.
- Vanwindekens, F. M., & Hardy, B. F. (2023). *The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water*.
- Wang, F., Weil, R. R., & Nan, X. (2017). Total and permanganate-oxidizable organic carbon in the corn rooting zone of US Coastal Plain soils as affected by forage radish cover crops and N fertilizer. *Soil and Tillage Research*, 165, 247-257.
- Wayman, S., Kucek, L. K., Mirsky, S. B., Ackroyd, V., Cordeau, S., & Ryan, M. R. (2017). Organic and conventional farmers differ in their perspectives on cover crop use and breeding. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(4), 376-385.
- Williams, S. M., & Weil, R. R. (2004). Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1403-1409.

- Woodings, F. S., & Margenot, A. J. (2023). Revisiting the permanganate oxidizable carbon (POXC) assay assumptions : POXC is lignin sensitive. *Agricultural & Environmental Letters*, 8(1), e20108.
- Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 161(9), 575-586. Scopus.
- Zhang, X., Zhang, W., Sai, X., Chun, F., Li, X., Lu, X., & Wang, H. (2022). Grazing altered soil aggregates, nutrients and enzyme activities in a *Stipa kirschnii* steppe of Inner Mongolia. *Soil and Tillage Research*, 219, 105327.
- Zhi, W., Yuan, L., Ji, G., Liu, Y., Cai, Z., & Chen, X. (2015). A bibliometric review on carbon cycling research during 1993–2013. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 6065-6075.
- Zhou, X. V., Larson, J. A., Boyer, C. N., Roberts, R. K., & Tyler, D. D. (2017). Tillage and Cover Crop Impacts on Economics of Cotton Production in Tennessee. *Agronomy Journal*, 109(5), 2087-2096.

Sitographie

Agreste, 2020. *Recensement agricole : Rapports et portraits de territoires* : <https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#c=report> (consulté le 30/05/2024)

Agreste, 2023. *Graph'Agri 2023 bovins : Productions laitières* : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2023Chap12.6/GraFra2023_bovins-productions-laitieres.pdf (consulté le 31/05/2024)

Agreste, cœur et coteaux de Comminges, 2020 : <https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#c=report&chapter=p07&report=r01&selgeo1=epci2020.20072643> (consulté le 02/07/2024)

Agrotransfert, 2018. *Guide méthodique du test bêche Structure et Action des vers de terre* : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/08/Guide-m%C3%A9thode-beche-web.pdf> (consulté le 27/06/2024)

ANSES, 2014. *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatives à une demande d'avis sur un projet de modification de la directive 2002/32/CE (substances indésirables en alimentation animale) : Nitrites et nitrates*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ALAN2014sa0133.pdf> (consulté le 26/07/2024)

Chambre d'agriculture de Haute-Garonne, 2023 : <https://haute-garonne.chambre-agriculture.fr/actualites/detail-de-lactualite/actualites/zone-vulnerable-du-nouveau-sur-la-zone-argile/> (consulté le 03/07/2024)

Chambre d'agriculture de Haute-Garonne, 2024. *Grandes cultures : Une production prépondérante en Haute-Garonne* : <https://haute-garonne.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/productions-vegetales/grandes-cultures/> (consulté le 06/06/2024)

Chambre d'agriculture d'Isère, 2017. *Le guide des couverts végétaux en interculture* : https://pointaccueilbio-hdf.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Auvergne-Rhone-Alpes/guide_couvert_vegetaux_janv_2017.pdf (consulté le 18/06/2024)

Chambres d'agriculture d'Auvergne-Rhône-Alpes, 2021. *Fiche de synthèse : Impacts agronomiques et économiques* : <https://agriressources.fr/couvert-vegetaux/les-bases-pour-reussir-un-couvert-vegetal/impacts-agronomiques-et-economiques/fiche-de-synthese-impacts-agronomiques-et-economiques/> (consulté le 18/06/2024)

Code rural et de la pêche maritime, 2023. *Article L1* : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043978760 (consulté le 03/07/2024)

Cœur coteaux de Comminges : <https://www.coeurcoteaux-comminges.fr/developpement-economique/l-agriculture/developpement-agricole-et-plan-d-alimentation-territorial-586> (consulté le 02/07/2024)

Les tutoriels du Pecnot'Lab. Respiration par incubation de 3 jours : <https://rhizobiome.gitbook.io/les-tutoriels-du-pecnotlab/protocoles-et-observations/activite-biologique/respiration/respiration-par-incubation-de-3-jours> (consulté le 07/08/2024)

Préfet de la région Occitanie. (2023). Arrêté du 21 décembre 2018 établissant le programme d'actions régional en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole pour la région Occitanie—Modifié par arrêtés du 25 janvier 2023 : https://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20230125_arrete_par_occitanie_consolide_suiteta.pdf (consulté le 03/07/2024)

Projet COTERRA : <https://projet-coterra.fr/> (consulté le 28/05/2024)

Annexe C : Equations utilisées pour calculer la valeur alimentaire, d'après (Alimentation des ruminants, INRAE, 2018)

Annexe C1 : Tableau récapitulatif des variables utilisées

Abréviation	Variable	Unité
UEb	Unité d'encombrement bovins allaitants	UE/kg MS
UEI	Unité d'encombrement bovins laitiers	UE/kg MS
UFL	Unité fourragère laitière	UF/kg MS
UFV	Unité fourragère viande	UF/kg MS
dMO	Digestibilité de la matière organique	%
dig	Digestibilité pepsine-cellulase	%
MM	Matière minérale	g/kg MS
MOD	Matière organique digestible	g/kg MS
TMS	Taux de matière sèche	%
MAT	Matière azotée totale	g/kg MS
MSVib	Matière sèche volontairement ingérée par les bovins allaitants	g MS/kg PV ^{0.75}
MSVII	Matière sèche volontairement ingérée par les bovins laitiers	
MS	Matière sèche	
PV	Poids vif	kg
MSVIm	Matière sèche volontairement ingérée par les moutons	g MS/ kg PV ^{0.75}
NIref	Niveau d'ingestion de référence	% PV
ECH ₄	Energie brute perdue sous forme de méthane	kcal/kg MS
EB	Energie brute	kcal/kg MS
MO	Matière organique	
ED	Energie digestible	kcal/kg MS
EU	Energie perdue dans les urines	kcal/kg MS
EM	Energie métabolisable	kcal/kg MS
ENL	Energie nette pour la lactation	kcal/kg MS
km	Coefficient d'efficacité de l'utilisation de l'EM en énergie nette pour l'entretien des bovins allaitants	
kf	Coefficient d'efficacité de l'utilisation de l'EM en énergie nette pour l'engraissement	
ENV	Energie nette pour la production de viande	kcal/kg MS
DT _{6N}	Dégradabilité théorique de l'azote dans le rumen avec un taux de passage de 6%/h	%
DT _N	Dégradabilité théorique de l'azote dans le rumen	%
PANDI	Protéines alimentaires non digestibles dans l'intestin	g/kg MS
DR _N	Digestibilité réelle de l'azote	%
PDIA	Protéines digestibles dans l'intestin qui n'ont pas été digérées dans le rumen	g/kg MS
NDFND	Neutral detergent fiber non digestibles	g/kg MS
NDFD _{int}	Neutral detergent fiber digestibles dans l'intestin	g/kg MS
AG	Acides gras totaux	g/kg MS
AGD _{int}	Acides gras digestibles dans l'intestin	g/kg MS
MOF	Matière organique fermentescible dans le rumen	g/kg MS
PDIM	Protéines digestibles dans l'intestin provenant des microorganismes du rumen	g/kg Ms

PDI	Protéines digestibles dans l'intestin	g/kg MS
BPR	Balance protéique ruminale	g/kg MS

Annexe C2 : équations utilisées pour calculer les UF

$$dMO = 29.7 + 0.63 * dig$$

$$MOD = (1000 - MM) * dMO * 0.01$$

$$MSVib = 6.44 + 0.782 * dMO + 0.112MAT + 0.679 * TMS$$

$$MSVII = 66.3 + 0.655 * dMO + 0.098 * MAT + 0.626 * TMS$$

$$MSVIm = -16 + 0.806 * dMO + 0.115 * MAT + 0.686 * TMS$$

$$UEb = 95/MSVib$$

$$UEI = 140/MSVII$$

$$Niref = \left(MSVIm * \frac{PV^{0.75}}{PV} \right) * 0.1 \text{ avec } PV = 60 \text{ kg}$$

$$ECH_4 = (45.42 - 6.66 * Niref + 0.75 * Niref^2) * 0.001 * MOD * 12.5$$

$$EB = (4531 + 1.735 * MAT(g/kg MO) + 82) * MO/1000$$

$$ED = EB * (-0.068 + 0.957 * dMO) * 0.01$$

$$EU = (2.9 + 0.017 * MAT - 0.47 * Niref) * EB * 0.01$$

$$EM = ED - ECH_4 - EU$$

$$ENL = EM * \left(0.65 + 0.247 * \left(\frac{EM}{EB} - 0.63 \right) \right)$$

$$UFL = ENL/1760$$

$$km = 0.287 * \frac{EM}{EB} + 0.554$$

$$kf = 0.78 * \frac{EM}{EB} + 0.006$$

$$ENV = EM * (km * kf * 1.5) / (kf + 0.5 * km)$$

$$UFV = ENV/1760$$

Annexe C3 : équations utilisées pour calculer les PDI et BPR

$$DT6_N = 51.2 + 0.14 * MAT - 0.00017 * MAT^2 + 4.4$$

$$DT_N = 27.6 + 0.76 * DT6_N - 0.000468 * DT6_N^2 - 5.45 * Niref + 0.0312 * DT6_N * Niref$$

$$PANDI = 7.9 + 0.08 * MAT - 0.00033 * MAT^2 - 1.9 - 2.3 - 2$$

$$DR_N = 100 * \frac{(1 - 0.01 * DT_N) * MAT - PANDI}{(1 - 0.01 * DT_N) * MAT}$$

$$PDIA = MAT * (1 - 0.01 * DT_N) * DR_N * 0.01$$

$$NDFND = 785 - 8.62 * dMO$$

$$NDFD_{int} = 11.4 + 0.08 * NDFND$$

$$AG = 1.78 + 0.105 * MAT$$

$$AGD_{int} = 6 + 0.599 * (9.7 + 0.75 * AG)$$

$$MOF = MOD - PDIA - AGD_{int} - NDFD_{int}$$

$$PDIM = (41.67 + 71.9 * 0.001 * MOF) * 0.8 * 0.8$$

$$PDI = PDIA + PDIM$$

$$BPR = \left(\left(\frac{MAT}{100} * DT_N \right) - \left(41.67 + 71.9 * \frac{MOF}{1000} \right) \right) - 14.2$$

Annexe C4 : Equations utilisées pour calculer le temps de pâturage théorique

$$UFL_{total} = \text{biomasse aérienne} * UFL_{couvert}$$

$$UFL_{troupeau} = (UFL_{entretien} + UFL_{lait} * prod_{lait}) * nb_{vaches}$$

$$PDI_{total} = \text{biomasse aérienne} * PDI_{couvert}$$

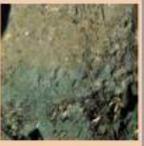
$$PDI_{troupeau} = (PDI_{entretien} + PDI_{lait} * prod_{lait}) * nb_{vache}$$

Avec $UFL_{entretien} = 7.6$ UF/j, $UFL_{lait} = 0.42$ UF/kg lait, $PDI_{entretien} = 612$ g/j et $PDI_{lait} = 55$ si $PDI_{couvert} \geq 110$ g/kg MS, 42 si $PDI_{couvert} \leq 90$ et 48 sinon d'après l'Idéle. La biomasse aérienne est exprimée en kg MS/ha.

$$Durée_{pâturage} = \min \left(\frac{UFL_{total}}{UFL_{troupeau}}; \frac{PDI_{total}}{PDI_{troupeau}} \right)$$

Annexe D: Grilles de notation du test bêche issues de (Guide méthodique du test bêche Structure et action des vers de terre, 2018)

Annexe D1 : Grille de notation de l'état structural du sol

Qualité de la structure	Apparence générale	Taille	Racines	Porosité visible	Apparence après extraction	Traits distinctifs	Apparence des agrégats ou fragments de ~ 1.5 cm de diamètre
Sq5 Très compact Très difficile de briser les mottes fermées avec les mains	Principalement mottes fermées angulaires	Mottes angulaires > 10 cm, très peu de taille < 7 cm	Pas ou peu de racines à l'intérieur des fragments. Les racines présentes sont concentrées autour des mottes fermées	Très peu de « pores visibles grossiers » et de fissures. Anoxie possible		 Couleur gris bleu possible	 1 cm Le sol peut être fragmenté quand le sol est humide, mais peut exiger un effort important. Habituellement pas de pores ou fissures visibles à l'œil
Sq4 Compact Assez difficile de briser les mottes fermées avec une seule main	Principalement mottes fermées subangulaires	Moins de 30 % des mottes sont de taille < 7 cm; structure lamellaire possible	Mottes fermées dans les « pores grossiers visibles » et les fissures	Peu de « pores grossiers visibles » et peu de fissures		 Racines dans les pores grossiers visibles	 1 cm Ces fragments de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide
Sq3 Ferme La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Présence possible de mottes fermées	Mélange d'agrégats de 2 mm-10 cm. Moins de 30 % < 1 cm		Présence possible de pores grossiers visibles et de fentes de retrait		 Faible porosité des agrégats	 1 cm Agrégats avec peu de pores visibles et plutôt arrondis
Sq2 Intact Agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Pas de motte fermée	Mélange d'agrégats arrondis de 2 mm à 7 cm	Les racines colonisent l'ensemble du bloc : les racines sont bien présentes à l'intérieur et autour des agrégats	La plupart des agrégats sont poreux		 Forte porosité des agrégats	 1 cm Agrégats arrondis, fragiles, poreux qui se cassent facilement
Sq1 Friable Agrégats se désagrègent très facilement entre les doigts		La plupart des agrégats < à 0.6 cm		Très poreux		 Agrégats fins et poreux	 1 cm Agrégats très poreux, composés de plus petits maintenus ensemble par les racines. Ils sont pour la plupart directement obtenus lors de l'extraction du bloc

Dans le cas d'un horizon non motteux (note Sq 1 ou 2), la notation de la bioturbation se fait à l'échelle de l'horizon dans son ensemble :

	B- Pas ou peu de bioturbation	B+ Bioturbation majoritaire
Traits distinctifs de reconnaissance	Majoritairement agrégats anguleux résultant de l'action du climat et / ou travail du sol. Pas ou peu d'agrégats biologiques.	Majoritairement agrégats arrondis, issus de l'activité biologique. Pas ou peu d'agrégats anguleux.
Illustrations		

Dans le cas d'un horizon motteux (note entre Sq 3 et 5), la notation de la bioturbation se fait sur les mottes : Dans chaque horizon casser les mottes en deux et observer les traces d'activité des vers de terre au sein des mottes. Identifier pour les plus grosses mottes la classe de bioturbation et déterminer ensuite **globalement** la classe de bioturbation majoritaire de l'horizon.

	B0 Pas de bioturbation	B1 Peu de bioturbation	B2 En cours de régénération	B3 Régénération très développée
Traits distinctifs de reconnaissance	Absence totale de traces de bioturbation.	Quelques traces de bioturbation, surtout des macropores.	Nombreuses traces, surtout localisées sur le pourtour de la motte. Présence de portion(s) tassée(s) non bioturbées de taille significative (3-5 cm).	Nombreuses traces, sur toute la surface de la motte. Éventuellement quelques petites portions tassées peu ou pas bioturbées isolées.
Illustrations				

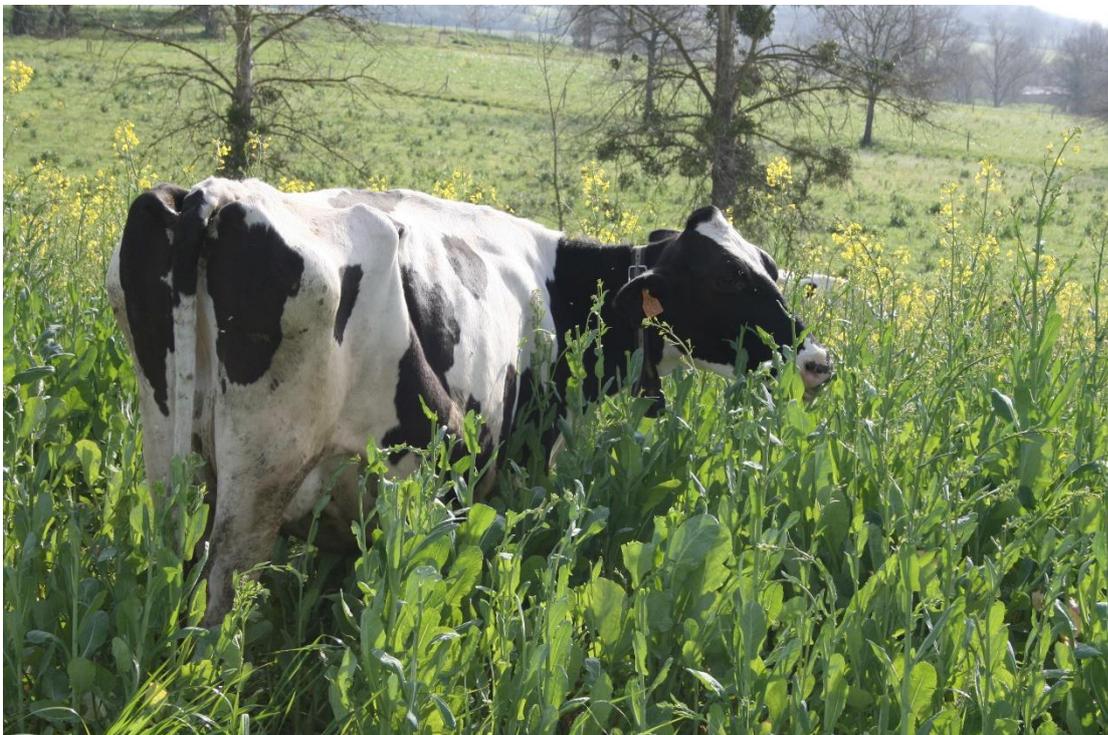
Annexe D3 : Exemple d'un test bêche effectué sur l'essai A



Annexe E : Essai A avant pâturage



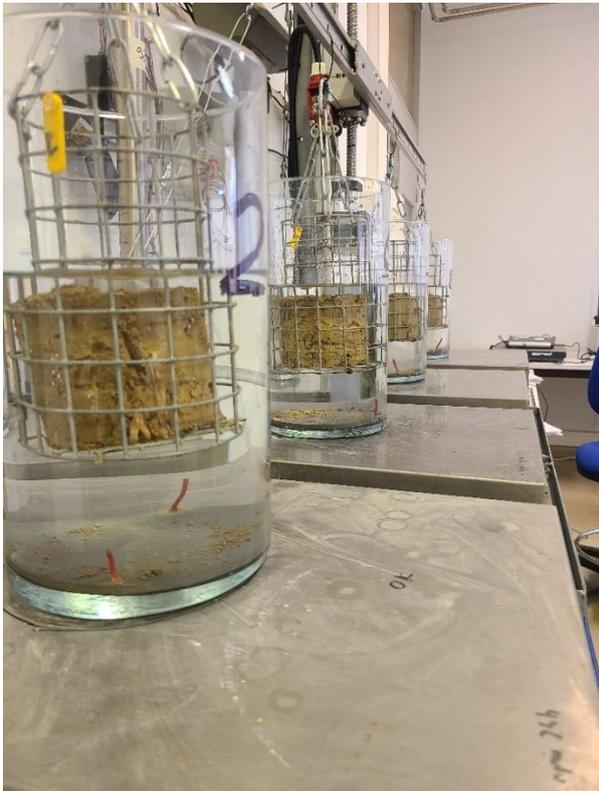
Annexe F : Pâturage sur l'essai A



Annexe G : Colza pâturé sur l'essai A



Annexe H : Prototype d'automatisation du Slake test



Abstract

Thanks to the various ecosystem services they provide, cover crops are an important lever for the agro-ecological transition. The use of these cover crops is currently increasing in farms specialised in field crop and cover crops are seen as a potentially interesting fodder resource in mixed crop-livestock farms. The aim of this study is to investigate the levels of ecosystem services provided by grazing multispecific cover crops. To do this, 2 experimental locations on mixed crop-livestock farms were studied. 4 species mixtures were sown in randomised blocks at the end of summer 2023 and grazed during spring 2024 by the farm's respective herds. Measurements of the physical, chemical and biological properties of the soil and quantities and chemical properties of the crops were taken before and after grazing. These measurements provide information on the level of ecosystem services such as: the quantity of forage available, the quality of the forage, the acquisition of elements (carbon, nitrogen, sulphur) and soil compaction. The results of this first year of experimentation show a significant difference between the two experimental locations because the grazing systems were very different. 3 mixtures showed very similar level of services. The acquisition of chemical elements and in particular the nitrogen catch crop effect were ensured by the rapid growth of the cover crops. A mixture containing white mustard has a lower feeding value and therefore it seems less interesting in the case of a late grazing. The wet conditions of the year led to soil compaction on the experimental site with a high stocking rate (75 dairy cows/ha). As the grazing was late, only part of the cover crop was consumed or destroyed by trampling. The cover crop grew over 7 to 8 months, producing a lot of biomass that was incorporated to the soil by shredding at the end of the experiment. These crop residues immobilize soil nitrogen as they decompose.

Key-words: cover crop, grazing, crop-livestock farming, agroecology

Résumé

L'implantation de cultures intermédiaires est un levier important de la transition agroécologique de par les divers services écosystémiques rendus. L'implantation de ces cultures intermédiaires se développe aujourd'hui en grandes cultures, et dans les exploitations de polyculture-élevage ces cultures représentent une ressource fourragère potentiellement intéressante. Cette étude vise à étudier les niveaux de services rendus par le pâturage de couverts multispécifiques. Pour cela, 2 sites expérimentaux dans des exploitations de polyculture-élevage ont été étudiés. 4 mélanges d'espèces ont été semés en blocs randomisés en fin d'été 2023 et pâturés au printemps 2024 par les troupeaux respectifs des exploitations. Des mesures sur les propriétés physiques, chimiques, biologiques du sol et les propriétés chimiques des cultures ont été faites avant et après pâturage. Ces mesures renseignent sur les niveaux de services écosystémiques tels que : la quantité de fourrage disponible, la qualité du fourrage, l'acquisition d'éléments (carbone, azote, soufre), la compaction du sol. Les résultats obtenus sur cette première année d'expérimentation montrent une différence marquée entre les deux sites expérimentaux car les systèmes de pâturage y étaient très différents. 3 mélanges ont montré des niveaux de services très similaires. L'acquisition d'éléments et notamment l'effet CIPAN ont été assurés par une croissance rapide des couverts. Un mélange contenant de la moutarde blanche a une plus faible valeur fourragère et semble donc moins intéressant dans le cas d'un pâturage tardif. Les conditions humides de l'année ont mené à une compaction du sol sur le site expérimental avec un fort chargement (75 UGB/ha). Le pâturage étant tardif, seule une partie du couvert a été consommé ou détruit par piétinement. Le développement des couverts a donc duré 7 à 8 mois ce qui a produit une biomasse conséquente qui a été restituée au sol par broyage à la fin de l'expérimentation. Ces résidus de cultures immobilisent de l'azote du sol lors de leur décomposition.

Mots-clés : Culture intermédiaire, pâturage, polyculture-élevage, agroécologie

COTERRA, un sigle pour :

« Repenser les **Collectifs** agricoles dans leurs **Territoires** pour plus d'**Autonomie** ». Nous travaillons avec des **agriculteurs et agricultrices du Nord Comminges** pour que chacun.e gagne en **autonomie**, sur son exploitation et grâce au collectif.

Notre projet de recherche-action implique de nombreux acteurs locaux, et c'est par cette collaboration que nous produisons les connaissances, au service du territoire.

Pour citer ce document :

Joulet Adrien (2024). Analyse des performances des couverts végétaux pâturés dans les systèmes d'élevage du Nord-Comminges. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech et UMR AGIR, 67 pages.

