



HAL
open science

Identification des caractéristiques végétales du stockage de carbone dans un milieu prairial selon quatre modalités de gestion

Luc Rodriguez

► **To cite this version:**

Luc Rodriguez. Identification des caractéristiques végétales du stockage de carbone dans un milieu prairial selon quatre modalités de gestion. Sciences de l'environnement. 2023. hal-04225294

HAL Id: hal-04225294

<https://hal.inrae.fr/hal-04225294v1>

Submitted on 2 Oct 2023

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.

Abstract :

Carbon sequestration in agricultural land and in particular grassland is a solution to reduce atmospheric carbon dioxide concentration. While plants could achieve this through photosynthesis and subsequent root production, little is known on best grassland management and related mechanisms that could optimize the latter. Through this internship, I studied the effects of grassland management; mowing with no fertilization, PK and NPK fertilization on root and POM (particulate organic matter; >1mm) stock following decades of undisturbed growth, and on roots and aerial biomass production and root morphology. Some insights on the effect of plant diversity were given by comparing NPK-fertilized diversified plots with an NPK-fertilized *Festuca arudinacea* monoculture. Results showed that fertilization mostly increases aerial biomass production while having little to no effect on root production, but the root and POM stock is vastly larger in fertilized culture. Root traits (morphology) showed an increase in short-lived and exploitative (i.e. fast growing) roots with fertilization, in particular N compared to unfertilized treatment. Diversity observations showed a bigger root production, root- and POM stock, accompanied by traits showing a larger root turnover, in diversified plots (i.e. higher species number). Suggesting that diversity has a beneficial contribution to carbon sequestration, while fertilization and management affect indirectly specific- (species number) and functional diversity and related grassland functioning.

Résumé :

La séquestration du carbone en milieu agricole et en particulier dans les prairies est une solution pour réduire la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique. Si les plantes sont capables d'accomplir cela par photosynthèse et la production racinaire qui en découle, les informations sont rares en ce qui concerne les meilleures pratiques de gestion des prairies et les mécanismes qui optimisent cette production. Au cours de ce stage, j'ai étudié les effets de la fauche sans fertilisation ou avec fertilisation PK et NPK sur les racines et POM (Particulate Organic Matter) d'un stock de racines non perturbé pendant plusieurs décennies et sur la production racinaire et aérienne de biomasse, ainsi que sur la morphologie racinaire. Quelques informations sur l'effet de la diversité végétale ont pu être faites en comparant des parcelles diversifiées fertilisées en NPK avec une monoculture de *Festuca arudinacea*. Les résultats montrent que la fertilisation augmente principalement la production de biomasse aérienne et n'a que peu d'effet sur la production racinaire, mais le stock de racines et de POM est plus important en culture fertilisée. Les traits morphologiques racinaires sont plus orientés vers l'exploitation et un turn-over rapide en fertilisation comparé à une absence de fertilisation. L'étude de la diversité montre une production et un stock de racines et de POM, ainsi que des traits montrant un turn-over plus rapide en diversité. Cela suggère que la diversité impacte positivement le stockage de carbone, tandis que la fertilisation affecte indirectement la diversité fonctionnelle et spécifique, et ainsi le fonctionnement prairial associé.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Katja Klumpp, Frédérique Louault et Catherine Picon-Cochard pour m'avoir offert ce stage, et pour leur encadrement et conseils au cours de celui-ci.

Je remercie Nicolas, pour ses conseils, remarques ô combien pertinentes, et pour son aide sur des statistiques pourtant simples.

Merci à Olivier et Sandrine pour leur aide sur les sujets techniques et sur la rigueur, sur le terrain et en laboratoire.

Je remercie profondément la team babyfoot, pour ces parties si drôles et déjantées, et qui vont me manquer.

Merci à la CNRS pour le soutien mental, les blagues et les conseils, la bonne humeur et les soirées, pour ces moments que je n'oublierai pas.

Un grand merci à Leslie, pour m'avoir décroché le stage et pour la formation express sur ces quatre premiers jours.

Merci aux doctorants, ingénieurs d'études et de recherche, post-doctorants et techniciens pour les petits conseils, les échanges et l'humour, ainsi que pour avoir contribué à la bonne humeur générale, en particulier Antonio et Tom qui m'ont marqué.

Enfin, un immense merci et une gratitude indescriptible à Marylou, sans qui les résultats ne seraient pas ce qu'ils sont, pour sa bonne humeur et les barres de rire au cours de ces journées interminables de manipulations qu'elle a enduré avec et pour moi.

Table des matières

| | | |
|--------|---|----|
| I. | La structure d'accueil..... | 1 |
| I.1. | INRAE..... | 1 |
| I.2. | UREP..... | 1 |
| II. | Contexte du stage | 2 |
| III. | Etat de l'art : | 4 |
| III.1. | Généralités..... | 4 |
| III.2. | Entrée du carbone dans le sol par voie biotique | 5 |
| III.3. | Stabilisation du carbone dans le sol..... | 6 |
| III.4. | Facteurs favorisant la production de matière organique | 6 |
| III.5. | Morphologie racinaire | 7 |
| IV. | Questions et hypothèses | 9 |
| V. | Matériel et méthodes | 10 |
| V.1. | Dispositif expérimental | 10 |
| V.2. | Détermination de l'état initial du stock de racines et carbone du sol | 12 |
| 2.1. | Carottage initial (non réalisé au cours du stage) | 12 |
| 2.2. | Morphologie racinaire | 12 |
| V.3. | Production de biomasse | 12 |
| 3.1. | Production racinaire par la méthode des Ingrowth Core (IGC)..... | 12 |
| 3.2. | Production de biomasse aérienne | 13 |
| 3.3. | Extraction KCL/K2SO4 du sol fin des IGC..... | 13 |
| 3.4. | Organisation des prélèvements au cours du projet | 13 |
| V.4. | Analyse statistique..... | 14 |
| VI. | Résultats | 15 |
| VI.1. | Conditions climatiques de la zone d'étude | 15 |
| VI.2. | Effet de la fertilisation | 15 |
| 2.1. | Impact du régime de fertilisation sur l'état initial | 15 |
| 1.1.a. | Stock racinaire | 15 |
| 1.1.b. | Morphologie des racines | 16 |
| 2.2. | Production de biomasse aérienne | 17 |
| 2.3. | Production racinaire (mesurée par la méthode IGC)..... | 18 |
| 2.4. | Root:shoot ratio | 19 |
| VI.3. | Effet de la diversité | 20 |
| 3.1. | Impact de la diversité sur l'état initial | 20 |
| 1.1.c. | Stock de racines..... | 20 |
| 1.1.b. | Morphologie racinaire..... | 20 |
| 3.2. | Production de biomasse aérienne | 21 |
| 3.3. | Production de biomasse racinaire | 21 |
| VII. | Discussion | 24 |
| VII.1. | Discussion des résultats, au vu des hypothèses | 24 |
| VII.2. | Aspects méthodologiques | 27 |
| 2.1. | Méthode des Ingrowth Core | 27 |
| 2.2. | Dispositif d'étude de diversité..... | 28 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Objectifs du projet MixRoot (modifié de mixmaxroot.com) | 4 |
| Figure 2: Principales voies d'entrée du carbone dans le sol et devenir de ce carbone (Cotrufo et al. 2022)..... | 5 |
| Figure 3 : Représentation des traits fonctionnels et des trade-off associés (Shao et al. 2019)..... | 8 |
| Figure 4 : Plan des parcelles du Système d'Observation et d'expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE) de Theix sur prairies permanentes. Les parcelles violettes représentent la fauche, tandis que les parcelles beiges représentent le pâturage. Les parcelles oranges correspondent à un abandon. | 10 |
| Figure 5 : Production de biomasse moyenne annuelle sur cinq ans sur les traitements étudiés (Louault et al. (2023) n=3 | 11 |
| Figure 6 : Résumé des différents prélèvements réalisés au cours du projet, de Juin 2022 (état initial) à octobre 2023 | 14 |
| Figure 7 : Evolution de la pluviométrie et de la température au cours des années 2022 et 2023 correspondants à la durée du projet..... | 15 |
| Figure 8 : Masse racinaire sèche du stock de racines en fonction du traitement et de l'horizon de sol..... | 15 |
| Figure 9 : Masse du stock de POM en fonction du traitement et de l'horizon de sol..... | 16 |
| Figure 10 : Relation entre la masse de POM et la masse de racines..... | 16 |
| Figure 11 : Specific Root Length (SRL, A), Root Tissue Density (RTD, B) et Diamètre moyen (C) en fonction du traitement et sur deux strates..... | 16 |
| Figure 12 : Production moyenne de biomasse aérienne lors des différents prélèvements (fauches), par traitement | 17 |
| Figure 13 : Répartition des groupes fonctionnels (graminées, légumineuses et dicotylédones non légumineuses (divers)) dans chaque traitement lors de chaque prélèvement (fauche). | 18 |
| Figure 14 : Cinétique de production de racines en fonction du traitement et de la strate. A correspond à la production IGC 2 (Octobre-Mars), et B correspond à la production IGC 3 (Mars-Juin) (cf Figure 6)..... | 18 |
| Figure 15 : DOC de chaque traitement et strate | 19 |
| Figure 16 : Masse du stock de racines en fonction de la diversité, pour chaque strate | 20 |
| Figure 17 : Masse du stock de POM en fonction de la diversité, pour chaque strate | 20 |
| Figure 18 : Figure 10 : SRL (A), RTD (B) et Diamètre moyen (C) en fonction de la diversité et de la strate..... | 21 |
| Figure 19 : Production de biomasse aérienne au cours de chaque prélèvement en fonction de la diversité.. | 21 |
| Figure 20 : Production racinaire en fonction de la diversité et de la strate, en hiver (Octobre à Mars, A) et au printemps (Mars à Juin, B)..... | 22 |
| Figure 21 : DOC en fonction de la diversité et de la strate..... | 23 |
| Figure 22 : Volume des carottes de sol pour les deux strates. Les pointillés indiquent le volume moyen pour chaque strate, et le trait noir en pointillé indique le volume théorique. Le volume de l'horizon 0-15 est significativement supérieur à la théorie..... | 27 |
| Figure 23 : Répartition du temps de travail au cours du stage | 29 |

Liste des abréviations

EJP : European Joint Program

IGC : InGrowth Core

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture et l'Environnement

MAOM : Mineral-Associated Organic Matter

POM : Particulate Organic Matter

RES : Root Economic Spectrum

RTD : Root Tissue Density

SOERE : Système d'observation et d'expérimentation pour la Recherche en Environnement

SRL : Specific Root Length

UREP : Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial

I. La structure d'accueil

I.1. INRAE

L'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), est un établissement public de recherche. C'est une communauté de 12 000 personnes avec plus de 200 unités de recherche et 42 unités expérimentales réparties sur tout le territoire français, et avec 166 projets de recherche européens. L'institut figure parmi les leaders mondiaux en matière de sciences agricoles et alimentaires, de sciences végétales et animales, et occupe la 11^e place mondiale en matière d'écologie et d'environnement. Le centre de Clermont a trois sites qui se trouvent à Theix, Crouël et Laqueuille.

I.2. UREP

La section de l'UREP (Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial) de l'INRAE étudie l'agroécologie des prairies dans le contexte des changements climatiques. En particulier, la recherche est axée sur les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote, les interactions biotiques et le développement des prairies, avec comme objectif de contribuer à une gestion durable de l'écosystème prairial face aux changements globaux. (Page d'accueil - Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (inserm.fr))

II. Contexte du stage

Les agroécosystèmes prairiaux sont parmi les écosystèmes les plus étendus au monde, recouvrant près d'un tiers de la surface émergée terrestre et sont répartis de façon homogène sur l'ensemble du globe (Dixon et al. 2014, Zhao et al. 2020). A l'échelle nationale les prairies se caractérisent par une surface considérable (9,3 Mha de prairie permanente et 2,9 Mha prairie temporaire, soit environ 40% de la Surface Agricole Utile (SAU) française) mais avec une dynamique de régression significative depuis les années 60 (12,3 Mha en prairie permanente en 1970 ; Agreste 2017). Outre les autres services qu'elles rendent à l'élevage et plus largement à la société, ils rendent un grand nombre de services écologiques (pollinisation, régulation de la qualité des eaux souterraines et climatique, production primaire) et un grand nombre de services pour l'Homme (production de fourrage, récréation) (Bengtsson et al. 2019). L'un de ces services, présentant un intérêt désormais primordial pour l'homme, est la capacité des sols prairiaux à stocker le carbone atmosphérique à long terme, ce qui permet d'atténuer le changement climatique (Lal 2004, Soussana et al. 2010). On estime en effet que les sols prairiaux représentent un des plus grands stocks de carbone terrestre au monde (Un tiers du carbone total). En France, 22% du carbone est stocké sous prairie, 26,5% dans les terres cultivées et 38,2% dans les sols de forêts, Chen et al. 2019, RMQS) Les sols possèdent la capacité d'en stocker encore plus (Crowther et al 2021). L'Europe, l'Afrique et l'Asie sont les continents avec le plus haut potentiel de séquestration de carbone en milieu prairial en raison de leur surface en sol dégradé, qui pourrait être restaurée, en plus de leur capacité à augmenter le stockage de sols non détériorés. Le taux actuel de séquestration mesuré en Europe (Cotrufo & Bai 2022) varie en moyen de -170 ± 330 kgC/ha/an pour les cultures et $+240 \pm 50$ kgC/ha/an pour les forêts et prairies (rapport 4p1000)

La variabilité de ce stockage du carbone dans les sols de prairies est liée à la diversité de l'âge des prairies, à la diversité de nature des sols et des conditions climatiques, à la diversité des modes de gestion de la prairie, et à la diversité de nature et de composition botanique des prairies elles-mêmes.

L'un des sujets étudiés sur le stockage de carbone en prairie sont des pratiques de gestions, qui jouent principalement sur un meilleur transfert du carbone vers le sol via la stimulation de la production nette, qui participe à un meilleur enracinement et à la fourniture de matière organique au sol, ou via le mode et l'intensité d'exploitation de l'herbe (qui jouent sur la quantité et qualité des litières végétales). Ces pratiques englobent la fertilisation (minérale et organique), le semis de légumineuses, les pratiques comme le pâturage ou fauche.

En ce qui concerne la production nette (aérienne et souterraine), en lien avec la gestion et les conditions pédoclimatiques, le couvert végétal alloue sa biomasse vers les parties aériennes dans un but de reproduction (génération), et vers les racines (captage de nutriments). Cette allocation peut changer si un des facteurs devient limitant, par exemple vers les parties aériennes si le facteur limitant est aérien (e.g. lumière, CO₂) (Poorter et al., 2011). Le stockage de C en prairie est lié à la fréquence/intensité de prélèvement de biomasse (fauches, pâturage) qui jouent sur la production primaire et donc sur les entrées de C vers le sol (i.e. Gos et al., 2016).

Ce sont ces pratiques de stimulation de la production nette (essentiellement via la fertilisation) d'une part, de gestion de l'exploitation de l'herbe d'autre part, qui sont a priori les plus prometteuses en termes d'amélioration du stockage de carbone en prairies permanentes et qui sont actuellement les plus documentées.

Dans l'équilibre entre allocation aérienne et souterrain et son effet sur le stockage du carbone, la biodiversité (nombre et le type d'espèces végétales) en prairie influence également le stockage de carbone. La composition spécifique et fonctionnelle des prairies évolue sous l'influence des pratiques de fertilisation et d'exploitation de l'herbe par la fauche et le pâturage.

Il semble que les prairies à flore complexe permettent un stockage de carbone plus élevé (Hungate et al., 2017, Lange et al., 2015). Ce stockage augmente en effet avec la richesse spécifique de la prairie et avec la présence de légumineuses (Mueller et al., 2017 ; Rutledge et al., 2017). Cet effet est probablement lié à une diversité de systèmes racinaires (plus ou moins denses et profonds), ainsi qu'à une augmentation de la disponibilité en azote en présence de légumineuses et à l'augmentation de la productivité primaire qui en découle. La richesse floristique diminue face à l'augmentation de la fertilisation azotée (Muller, 2003), tandis que la biomasse aérienne augmente (Pontes et al., 2007). Cependant, en monoculture de prairie, la production (racinaire) est stimulée par une faible fréquence de fauche et un faible apport azoté en comparaison à une plus forte fréquence de fauche et des apports azotés (Picon-Cochard et al, 2009).

Lancé par la France lors de la COP 21 en 2015, l'initiative quatre pour mille a pour objectif d'augmenter le stockage du CO₂ atmosphérique dans les sols (principalement agricoles et forestiers) de 0,4% chaque année, ce qui permettrait de compenser la libération anthropique du CO₂ dans l'atmosphère (8,9 Gt C par an, Minasmy et al. 2017) afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (European green deal, ministère de l'agriculture)

Le stock de carbone est la quantité de carbone se trouvant dans le sol, à un instant T.

Le stockage de carbone est l'évolution dans le temps du stock de carbone.

Le projet européen MixRoot, financé par EJPsoil (<https://ejpsoil.eu/>) s'inscrit dans cette dynamique. Il a pour but principal de mesurer la production de racines dans différents agroécosystèmes en Europe (prairies, agroforesterie, cultures intercalaires) et évaluer si les systèmes diversifiés en espèces favorisent les apports de carbone souterrains au travers du système racinaire et ainsi la séquestration de carbone. La production de carbone des racines *in situ* est étudiée en détail dans le contexte des agrosystèmes diversifiés en Europe, afin de déterminer les caractéristiques racinaires liées au stockage du carbone dans les couches de surface ainsi que dans le sol profond.

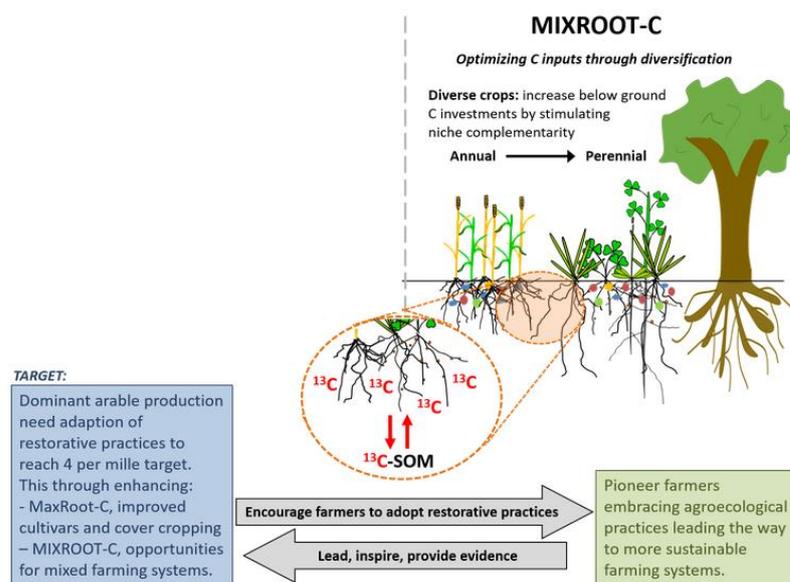


Figure 1: Objectifs du projet MixRoot (modifié de mixmaxroot.com)

Ce stage se situe au sein du projet MixRoot et porte sur des prairies permanentes localisées dans le Puy de Dôme sur un dispositif de suivi à long terme des propriétés des prairies soumises à différentes pratiques agricoles. Nous avons étudié l'impact des pratiques de fertilisation sur la production de biomasse aérienne et racinaire, ainsi que l'impact de la diversité sur la production de biomasse aérienne et souterraine.

III. Etat de l'art :

III.1. Généralités

Les sols concentrent une part majeure (80%) du carbone présent dans les écosystèmes terrestres. La quantité totale de carbone présent dans ces derniers équivaut à 3170 Gt, dont

2500 Gt dans les sols (Lal et al. 2008). Celui-ci se trouve sous deux formes dans les sols : inorganique, composé de carbone élémentaire et de composés carbonés tels que la calcite, la dolomite, et le gypse (Lal 2004) et représente 950 Gt, et le carbone organique, composé de débris animaux et végétaux frais, capable de se décomposer rapidement, d'humus composant la majorité du carbone organique, et de carbone presque minéral sous forme de charbon et graphite issu de la décomposition de matière végétale au cours des successions géologique (Taylor et al. 2009, Allison 1965.). Le carbone organique est aussi composé de biomasse vivante animale et végétale, représentant 560 Gt (Oelkers et Cole 2008).

Il est donc envisageable de réduire la teneur en CO₂ atmosphérique par diverses méthodes évoquées par Oelkers et Cole (2008) (séquestration abiotique par injection de CO₂ liquéfié dans les océans ou le sol, carbonatation minérale, séquestration biotique dans les océans). L'une de ces méthodes nous intéresse, il s'agit de la séquestration biotique de carbone dans le sol au travers des végétaux.

III.2. Entrée du carbone dans le sol par voie biotique

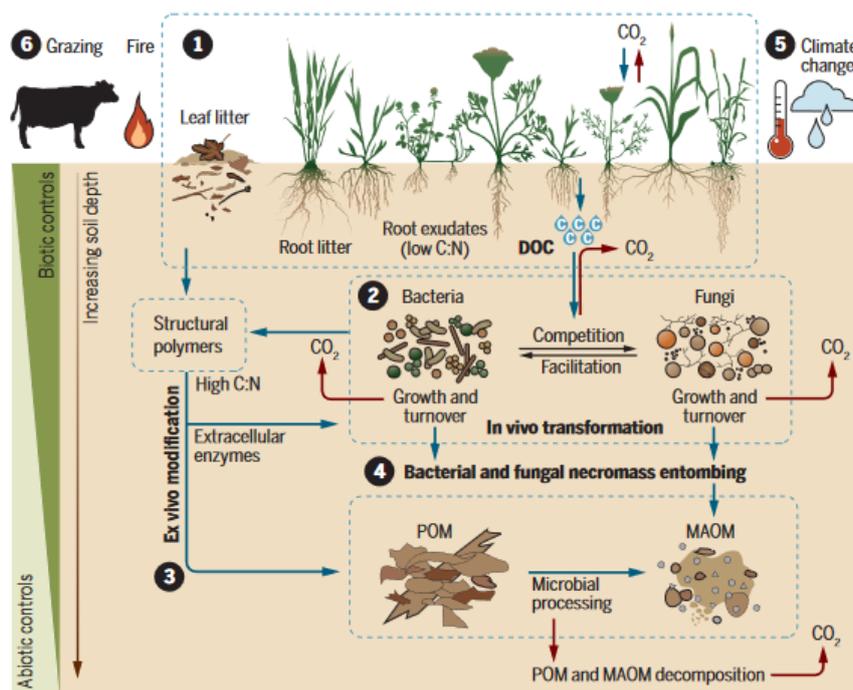


Figure 2: Principales voies d'entrée du carbone dans le sol et devenir de ce carbone (Cotrufo et al. 2022)

Plus précisément, le stockage du carbone dans le sol commence par l'entrée dans le sol de matière organique d'origine foliaire et racinaire (racines et sécrétion racinaires, mycorhizes et bactéries), séparées en POM (Particulate Organic Matter) ou MAOM (Mineral-Associated Organic Matter) en fonction de la taille des particules de matière organique et de leur nature) et la décomposition de cette matière organique. Il est important de noter que cette matière organique entre dans le sol sous différentes formes, qui seront plus ou moins faciles à

dégrader par la pédofaune et les micro-organismes du sol ; les racines possédant une plus forte teneur en composés récalcitrants tels que la lignine ou la subérine (Silver et Miya, 2001), leur décomposition sera 1,5 à 2,8 fois plus lente que celle des feuilles et tiges (Freschet et al, 2013). A cela s'ajoutent les pratiques qui jouent principalement sur un meilleur transfert du carbone vers le sol via la stimulation de la production nette, qui participe à un meilleur enracinement et à la fourniture de matière organique au sol, ou le mode et l'intensité d'exploitation de l'herbe (qui jouent sur la quantité et qualité des litières végétales) où ces pratiques englobent la fertilisation (minérale et organique).

III.3. Stabilisation du carbone dans le sol

La matière organique peut être séquestrée dans la matrice du sol et être protégée de l'activité des décomposeurs par l'encapsulation dans les particules de sol (Baldock & Skjemstad, 2000), augmentant le temps de résidence du carbone dans le sol sur une durée allant de 2000 à 10 000 ans pourvu que le sol ne soit pas perturbé par l'apport de carbone organique récent (Fontaine et al. 2007), ou par les activités humaines brisant la structure du sol (labourage, par exemple) (Baldock & Skjemstad, 2000). Dungait et al. (2012) montrent que la récalcitrance n'est pas le paramètre principal dictant la durée de résidence du carbone dans le sol, car les décomposeurs peuvent dégrader tout type de substrat, mais que cette durée dépend de sa capacité à s'associer à la matière minérale (Basile-Doelsch et al. 2020). La matière organique est stabilisée par deux mécanismes principaux (Kleber et al. 2015) :

- L'adsorption sur la surface de minéraux, lorsque l'affinité d'une particule pour son substrat est plus forte que l'affinité pour le site actif d'une enzyme, la dégradation oxydative ne peut s'effectuer (Kleber et al. 2007).
- La précipitation des composés organiques par des métaux (Fe et Al principalement), formant des matrices permettant l'adsorption de matière supplémentaire et éventuellement un cristal à mesure que le processus dure. (Masion et al. 2000, Mikutta 2011)

Eusterhues et al. (2014) montrent que des composés adsorbés ou précipités sont extrêmement résistants à la dégradation organique, avec 1% de dégradation sur une période de 68 jours.

III.4. Facteurs favorisant la production de matière organique

La séquestration de carbone nécessite donc une production de biomasse qui sera décomposée et contribuera au stockage de carbone. Les facteurs favorisant la production de biomasse sont divers, complexes et ne sont pas entièrement compris, mais des tendances peuvent être dégagées. La fertilisation est un facteur clé de régulation du stockage de carbone

sous prairie (Soussana et Lemaire, 2014). Les prairies permanentes peuvent recevoir différents éléments minéraux (N, P, K, Mg, Ca, S) sous la forme d'engrais (azotés, phosphatés, potassiques) et d'amendements (magnésie, soufre et chaux). Parmi ces apports en éléments minéraux, l'effet des engrais N, P et K et du chaulage sont les plus étudiés. L'azote étant l'un des principaux facteurs limitant la croissance végétale (avec l'eau), la fertilisation azotée permet d'augmenter le rendement de biomasse aérienne (Smith et al. 1999, Zhang et al. 2015), mais cause une réduction de la diversité spécifique (Payne et al. 2017, Clark et Tillman, 2008, Steven et al. 2004). Il semble que l'ordre de grandeur du stockage additionnel par rapport à une situation non fertilisée s'échelonne de 0 à +0,3 t C ha⁻¹.an⁻¹. Un apport élevé peut également stimuler la minéralisation de la matière organique des sols et par conséquent réduire le stockage de C dans le sol (Jones et Donnelly, 2004). Il semble qu'environ 1,2 kg d'azote soit nécessaire pour stocker 1 kg de carbone (Poeplau et al., 2018, Klumpp et Graux 2019). Le phosphore est l'un des autres facteurs limitant la croissance végétale (Bieleski 1973), et son application en culture augmente la production de biomasse, mais moins que l'ajout d'azote (Li et al. 2022). Le potassium, quant à lui, facilite l'absorption des nutriments (Xu et al. 2020). De plus, la fertilisation par le phosphore augmente la teneur en légumineuses, là où la fertilisation par l'azote la réduit (Aydin et Uzum, 2005). *La fertilisation contribue à une production de biomasse aérienne plus importante, cependant on en sait peu sur l'effet de la fertilisation sur la production aérienne et racinaire (cf hyp 1)*

III.5. Morphologie racinaire

En étudiant la morphologie racinaire, on décrit les caractères, ou traits racinaires, qui sont le reflet d'une stratégie permettant la survie de la plante.

Un trait morphologique, ou trait fonctionnel, est défini comme « un trait morpho-physico- phénologique qui influe sur les aptitudes d'un individu en agissant sur la croissance, la reproduction et la survie de cet individu » (Violle et al, 2007). Les traits peuvent s'étudier à l'échelle de l'espèce végétale en culture pure ou à l'échelle de la communauté (mélanges des systèmes racinaires, trait moyen de la communauté).

On peut distinguer deux grands « groupes de traits fonctionnels » qui marquent généralement des compromis entre les différentes fonctions pouvant être accomplies par une plante, déterminant des « stratégies » (Lavorel et al., 2007). Ainsi, les espèces à croissance rapide (**stratégie d'acquisition**) sont notamment caractérisées par des valeurs élevées de surface spécifique foliaire et les espèces à croissance lente (**stratégie de conservation**) présentent quant à elles des caractéristiques opposées avec (Wright et al., 2004 ; Diaz et al., 2004). De même, au niveau racinaire, une forte densité racinaire (RTD) et un grand diamètre

racinaire favorise la longévité des racines, caractéristiques retrouvées chez les espèces à croissance lente (Roumet et al., 2016). A l'inverse, des espèces adoptant une stratégie d'acquisition rapide des ressources ont une longueur spécifique des racines (SRL) plus élevée, une forte concentration en azote dans les tissus (RNC) et un taux de respiration plus élevé que chez les espèces à croissance lente (Picon-Cochard, et al., 2012).

La morphologie racinaire pourrait jouer un rôle dans le stockage de carbone (Bardgett et al. 2014). De précédentes études sur le système étudié montrent une longueur racinaire

SRL : la longueur racinaire spécifique (Specific Root Length) est une variable correspondant au ratio de la longueur racinaire par la masse racinaire sèche et permet de mesurer le rapport entre l'acquisition de ressources (longueur racinaire) et l'investissement de ressources (masse). Une SRL élevée est liée à une plus grande capacité à absorber eau et nutriments, une durée de vie racinaire plus faible et une plus grande croissance (Roumet et al. 2006).

RTD : La densité tissulaire racinaire (Root Tissue Density) est le ratio de la masse racinaire par le volume racinaire. C'est un proxy de la durée de vie racinaire et de la capacité de croissance plus lente. Une RTD élevée caractérise une capacité à se développer dans un milieu pauvre en nutriments (Ryser 1996).

RES : Le spectre économique racinaire (Root economic spectrum) est l'équivalent souterrain du spectre économique foliaire (Leaf economic spectrum), qui propose la répartition des parties aériennes des végétaux le long d'un spectre économique dont un extrême est la conservation de ressources et l'augmentation de la durée de vie et l'autre est l'acquisition de ressources (Wright et al. 2004).

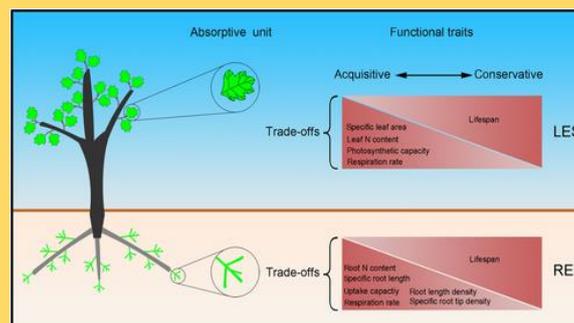


Figure 3 : Représentation des traits fonctionnels et des trade-off associés (Shao et al. 2019)

spécifique (SRL) plus élevée en milieu non fertilisé qu'en milieu fertilisé (Gerle 2020), confirmé par d'autres études (Leuschner et al. 2013). Lu et al. (2023) montrent que la densité tissulaire des racines (RTD) diminue avec la fertilisation, et montrent également que la SRL est corrélée

à l'exsudation racinaire, augmentant la quantité de carbone facilement disponible pour les micro-organismes du sol. La SRL est généralement plus élevée sur les couches les moins profondes du sol et diminue avec la profondeur, au contraire de la RTD qui évolue en sens inverse (Fort et al 2016). *La morphologie racinaire étant affectée par la diversité du couvert végétal ainsi que par la gestion et la fertilisation des prairies, cela pourrait donner des indications sur le stockage de carbone (cf hyp 3).*

IV. Questions et hypothèses

Ce rapport comprendra deux grands axes distincts :

Tout d'abord, nous verrons l'impact des pratiques de gestion sur l'état initial et la productivité aérienne et racinaire de parcelles de prairie permanente et chercherons à répondre à ces questions et hypothèses :

- 🌱 Quel est l'impact d'un gradient de fertilité :
 - Sur la production aérienne et racinaire
 - Sur le stock racinaire et la morphologie des racines
- 🌱 Quel est l'impact de la diversité spécifique
 - Sur la production aérienne et racinaire
 - Sur le stock racinaire et la morphologie des racines

Hypothèses :

- 🌱 H1 : Les pratiques de gestion impactent la production de biomasse aérienne et souterraine, qui augmentent le long d'un gradient de fertilisation.
- 🌱 H2 : La fertilisation impacte la diversité fonctionnelle des prairies
- 🌱 H3 : La morphologie racinaire est orientée vers une stratégie d'exploitation lorsque la fertilisation est élevée, et une stratégie de conservation des ressources en absence de celle-ci, ce qui pourrait affecter le stockage de carbone.

Ensuite, nous verrons si ces questions et hypothèses peuvent être appliquées à une comparaison entre une monoculture et une prairie diversifiée :

- 🌱 H4 L'état initial sera différent dans une prairie diversifiée comparé à une monoculture.
- 🌱 H5 Une prairie diversifiée sera plus productive qu'une monoculture.
- 🌱 H6 Les traits racinaires seront-ils différents entre les deux types de prairie ?

V. Matériel et méthodes

V.1. Dispositif expérimental

Les expérimentations ont été réalisées sur deux zone d'étude i) le SOERE (Système d'observation et d'expérimentation pour la Recherche en Environnement) prairie permanente de Theix et ii) « La Collection » testant des graminées prairiales sur cinq ans en monoculture avec une espèce présente sur la prairie permanente. Les zones d'étude se situent à 880 mètres d'altitude, la température moyenne annuelle est de 8.7°C et le niveau de précipitation moyen est de 800 mm par an. Le site de Theix

La prairie permanente est un **couvert végétal herbacé installé depuis de nombreuses années**. Elle est caractérisée par une grande richesse d'espèces végétales spontanées en équilibre écologique sous l'effet conjoint du milieu et des pratiques agricoles.
(Dicoagroecologie.fr)

(figure 4) comporte un ensemble de parcelles fauchées (3 fauches par an), soumises à un gradient de fertilisation avec N0 : Aucune fertilisation, PK : Phosphore/Potassium et NPK : Azote/Phosphore/Potassium depuis 2005, ce qui permet de les détacher des conditions initiales du site avant la mise en place du SOERE. Le dispositif est organisé en deux blocs avec 2 parcelles du même traitement par bloc. Les sols des blocs présentent de légères différences compte tenu de leur formation volcanique ; le bloc 1 est un cambisol eutrique, et le bloc 2 est un cambisol colluvique. Pour le programme Mixroot, chaque mode de gestion,

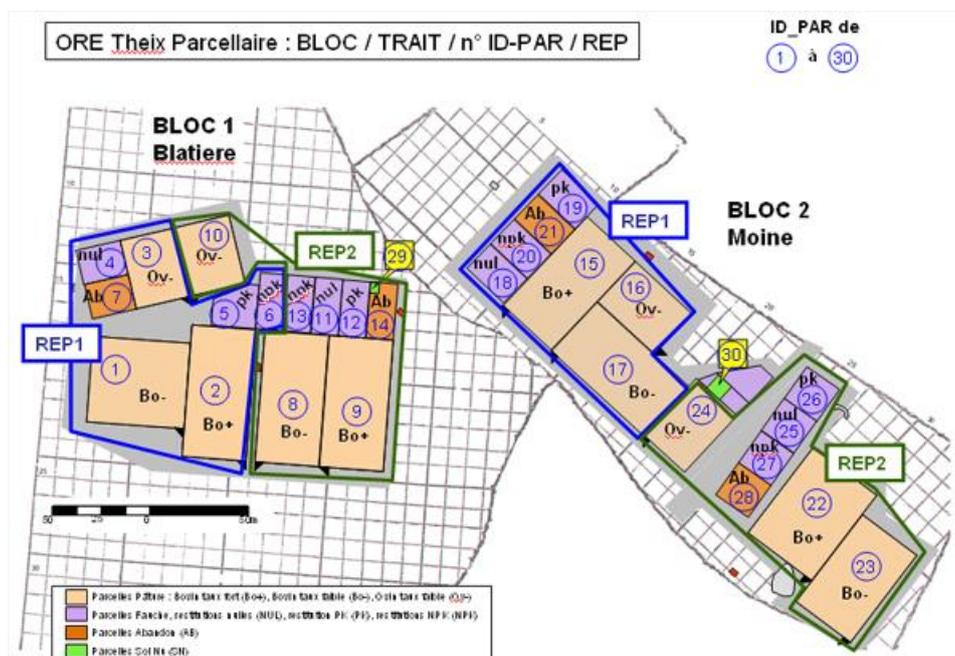


Figure 4 : Plan des parcelles du Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE) de Theix sur prairies permanentes. Les parcelles violettes représentent la fauche, tandis que les parcelles beiges représentent le pâturage. Les parcelles oranges correspondent à un abandon.

soit fauche non fertilisé (F_NO), fauche fertilisé PK, (F_PK), fauche fertilisé NPK, (F_NPK) a été répété sur trois parcelles de prairie permanente de l'expérimentation SOERE (en violet sur la carte en figure 4). Il s'agit des parcelles 4, 5, 6, 11, 12, 13, 25, 26, 27. Les parcelles 18, 19 et 20 ont été écartées en raison de leur profil pédologique légèrement différent des autres. Afin de tenir compte de l'hétérogénéité au sein de chaque parcelle, trois pseudo-réplicats ont été réalisés sur chaque parcelle. Sur « La Collection » nous avons choisi trois placettes de monoculture *Festuca arundinacea* (S), cette espèce étant une des espèces présentes dans les communautés végétales des trois traitements du SOERE Theix. « La Collection » est soumise à la même fréquence de fauche et à la même fertilisation NPK que le traitement F_NPK du SOERE Theix.

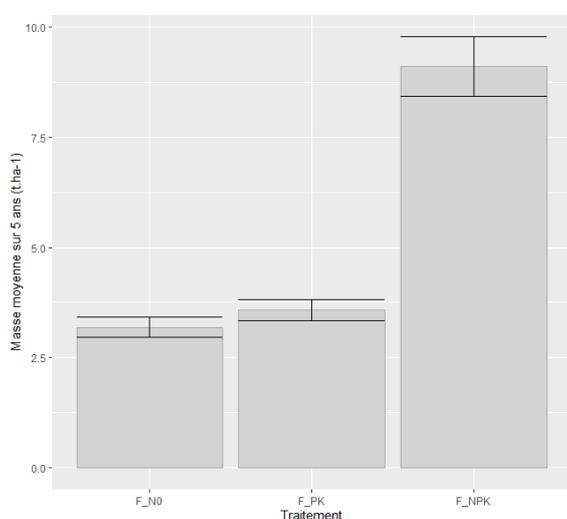


Figure 5 : Production de biomasse moyenne annuelle sur cinq ans sur les traitements étudiés (Louault et al. (2023) n=3)

Les analyses du nombre d'espèces végétale et la production aérienne des 3 traitements des prairies permanentes (F_NO, fertilisation F_PK et F_NPK) montrent que le nombre d'espèce diminue selon le gradient de fertilisation (tableau 2) avec le plus grand nombre d'espèces en F_NO et le plus bas en F_NPK (tableau 1)

La production moyenne annuelle de biomasse sur les cinq années précédant le projet MixRoot (2016 à 2020) sont indiquées en figure 5. On voit une biomasse très importante sur le traitement

F_NPK, mais il n'y a pas de différence significative entre les traitements F_NO et F_NPK.

Tableau 1 : Stockage de carbone sur 0-60cm estimé sur le SOERE. n = 3 parcelles par traitement, 3 campagnes d'inventaire de sol (données non publiées)

| | F_NO | F_PK | F_NPK |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| Stockage du C (t C/ha/an) | +0,42 | -0,04 | +0,92 |
| Erreur standard | 0,37 | 0,67 | 0,42 |

Tableau 2 : Nombre d'espèces par parcelle présentes sur les différents traitements du SOERE (relevés botaniques de 2021, données non publiées, n=3)

| | F_NO | F_PK | F_NPK |
|---|------|------|-------|
| Nombre d'espèces moyen | 29 | 22 | 18 |
| Nombre d'espèces dont la présence est supérieure à 5% | 8 | 8 | 5 |

Un suivi du carbone depuis 2005 réalisé sur trois inventaires du sol montre un stockage de carbone positif sur les traitements NO et NPK, mais les données sont

encore à vérifier considérant la variabilité importante (tableau 2)

Ce dispositif, nous permettant de mesurer l'impact des pratiques de fertilisation sur la production de biomasse, est complété par une monoculture semée de fétuques (*Festuca arundinacea* (S)) fertilisée en NPK (traitement F_Fetuque_NPK) qui nous permettra de mesurer l'impact de la diversité spécifique en faisant office de témoins négatif.

V.2. Détermination de l'état initial du stock de racines et carbone du sol

2.1. Carottage initial (non réalisé au cours du stage)

Le stock de racine et C du sol a été estimé en faisant un carottage d'une profondeur maximale d'un mètre avec un gouge d'un diamètre de 8.6cm. La carotte de sol prélevée a été divisée en quatre horizons : 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm et 50-100 cm. Chaque horizon a été tamisé à 2mm (sol fin >2mm) et séché à l'air pendant deux semaines, et les refus ont été lavés pour extraire deux compartiments ; les racines (stock racine) et les particules de matière organique (POM) >1mm et éléments minéraux < 1mm. Les POM et les racines ont été prélevées et pesées en frais et sec (séchage à 60°C pendant 48h).

2.2. Morphologie racinaire

Un sous échantillon des racines obtenues lors du lavage des carottes initiales a été utilisée pour déterminer la morphologie racinaire. Pour cela, des racines sont colorées au bleu de méthylène, étalées dans une cuve de verre et scannées (Epson v800 photo), puis analysées grâce au logiciel RhizoVision Explorer. Elles sont ensuite séchées à 60°C pendant quarante-huit heures. Le logiciel permet de séparer les racines selon différentes classes de diamètre (de moins de 0,1mm à plus d'1mm, avec un pas de 0,1 mm) et d'en obtenir le diamètre moyen et la longueur totale permettant de calculer la SRL (Specific root length, $\frac{\text{Longueur totale}}{\text{Masse échantillon}}$) et la RTD (Root Tissue Density, $\frac{\text{Masse échantillon}}{\text{Volume total}}$). La structure des fichiers rendant l'analyse manuelle laborieuse (chacun des 66 échantillons donnant un fichier indépendant), un programme R permet d'automatiser le processus.

V.3. Production de biomasse

3.1. Production racinaire par la méthode des Ingrowth Core (IGC)

La méthode des Ingrowth core (abrégé en IGC dans le reste de ce document) est la méthode de référence pour la mesure de la production racinaire en prairie (Steen et al, 1984 ; Freschet et al. 2022).

Il s'agit de l'implantation d'un filet en plastique en maillage de 0,5 cm dans un trou de 8.6 cm de diamètre et de 30 cm de profondeur. Le filet est rempli de terre préalablement tamisée à 1 cm puis séchée à l'air pour retirer la majorité des racines correspondant à un volume de 1742 cm³. Le filet est installé la première fois au début de la croissance de la végétation et retiré après une période de croissance variable (figure 6), puis rempli une deuxième fois et ainsi suite. L'IGC prélevé est travaillé en laboratoire ; la masse est scindée en deux horizons (0-15 cm et 15-30 cm) et chacun est tamisé pour récupérer le sol fin (< 2mm), puis le refus est lavé pour ne conserver que les racines, les POM sont jetées. Une partie de la terre fine est pesée puis séchée à 105°C pendant 48h et pesée à nouveau afin de mesurer le taux d'humidité, permettant de corriger la teneur en azote et DOC (voir paragraphe suivant).

3.2. Production de biomasse aérienne

Pour les suivis de production aérienne, les prélèvements sont effectués aux mêmes dates que les fauches. L'herbe est collectée à l'aide d'une mini-tondeuse à l'intérieur d'un cadre de prélèvement de 30 par 30 cm, coupée à 5,5 cm par convention (basée sur le broutage, qui se fait à 5,5 cm), puis triée par groupe fonctionnel (Légumineuses, graminées et Dicotylédones non légumineuses) avant d'être séchée et pesée.

3.3. Extraction KCL/K₂SO₄ du sol fin des IGC

Pour déterminer les exsudats des racines et leur prélèvement d'azote pendant la croissance racinaire, le sol tamisé <2mm subit une extraction avec une solution KCL 1M pour extraire l'azote minéral (NH₄/NO₃) et avec une solution K₂SO₄ 0.025M pour extraire le carbone soluble du sol (DOC). Pour les analyses quarante grammes de terre sont mélangés à 10ml de solution, puis agités par retournement avant d'être centrifugés à 4000 ou 5000 tours/min pendant 5 et 20 min (respectivement pour l'extraction KCL et K₂SO₄). Le surnageant est filtré puis congelé avant analyse par un laboratoire partenaire.

3.4. Organisation des prélèvements au cours du projet

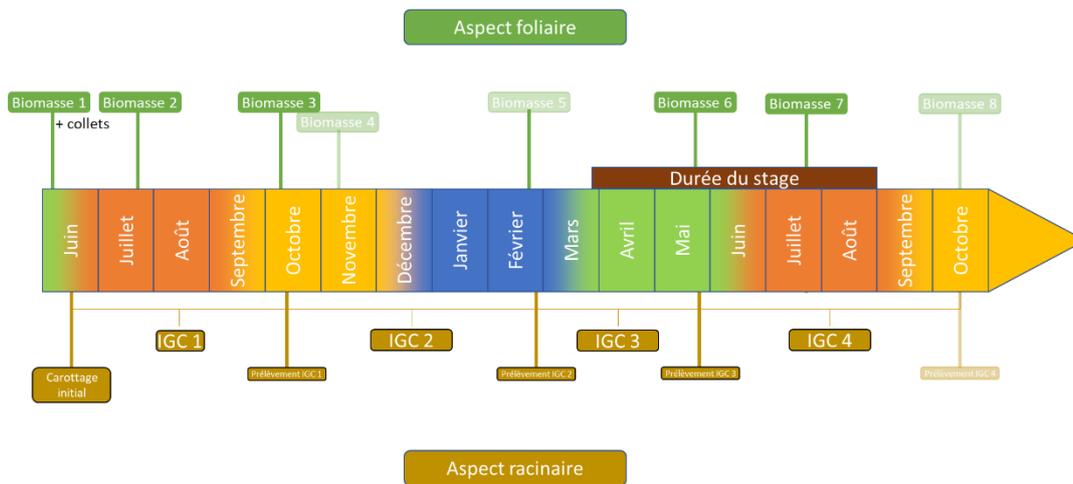


Figure 6 : Résumé des différents prélèvements réalisés au cours du projet, de Juin 2022 (état initial) à octobre 2023

Les biomasses ont été récoltées aux dates de fauche, notamment en Juin 2022 et Mai 2023 correspondant au pic de biomasse, puis en juillet et en octobre pour obtenir le reste de la biomasse produite lors de la période de production. Certains prélèvements coïncident avec la collecte des IGC, afin de minimiser les déplacements sur le terrain. Les prélèvements de biomasse en transparence sont des prélèvements qui ont été réalisés mais qui n'apparaîtront pas dans ce rapport, ou bien sont des prélèvements qui auront lieu après l'issue du stage. L'organisation des différents prélèvements est résumée en figure 6.

V.4. Analyse statistique

Les résultats sont analysés par une ANOVA à deux facteurs (Traitement et profondeur, et interactions traitement/profondeur pour le sol, et Traitement et Prélèvement, et interactions traitement/prélèvement pour les fauches), si nécessaire transformés par un log10 ou une racine carrée pour assurer la normalité des données et les tests post-hoc sont réalisés avec un test de Tukey. Les statistiques ont été réalisées en considérant qu'une parcelle représente l'individu statistique, et que les valeurs de chaque parcelle sont les valeurs moyennes des trois pseudo-réplicats réalisés au sein de celle-ci. Le logiciel utilisé est R version 4.2.3.

VI. Résultats

VI.1. Conditions climatiques de la zone d'étude

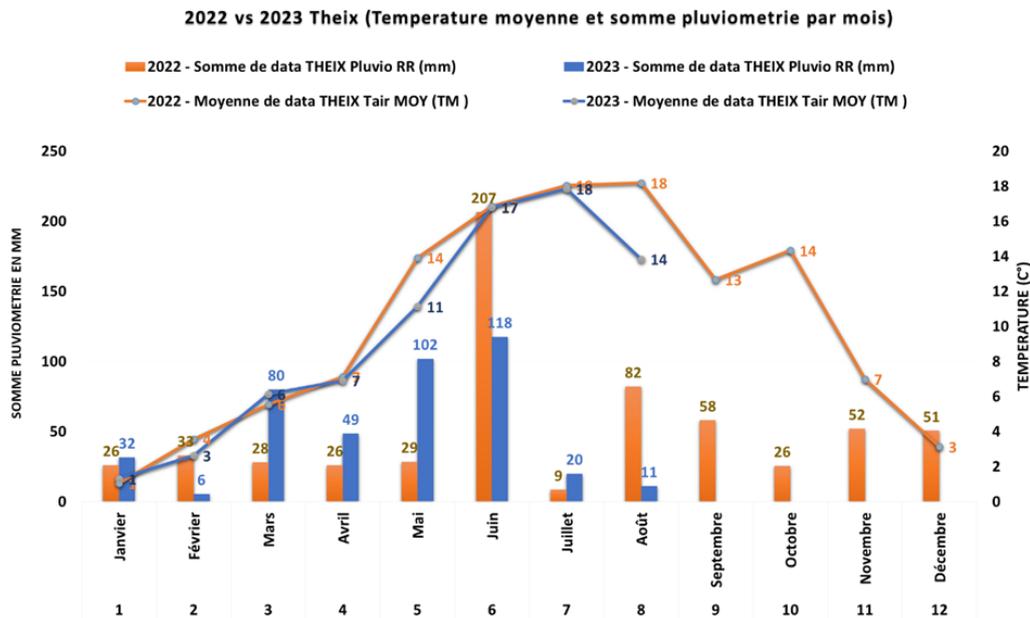


Figure 7 : Evolution de la pluviométrie et de la température au cours des années 2022 et 2023 correspondants à la durée du projet

Au niveau journalier, nous pouvons voir un pic de précipitations en Juin 2022, mais une pluviométrie plus faible lors des mois précédents comparé à 2023 (figure 7).

VI.2. Effet de la fertilisation

2.1. Impact du régime de fertilisation sur l'état initial

1.1.a. Stock racinaire

La majorité (68%) des racines se situe dans l'horizon 0-15 cm, avec une quantité de racine supérieure sur le traitement F_NPK ($p = 0.1$). La masse racinaire diminue rapidement avec l'augmentation de la profondeur, pour atteindre une fraction très faible à l'horizon 50-100 cm de la masse racinaire présente à 0-15 cm. Pour chaque traitement, le stock ou la masse de racines initiale totale sur le profil est de 4.53 ; 4.4 ; 6 t.ha⁻¹ pour respectivement F_N0, F_PK et F_NPK (figure 8)

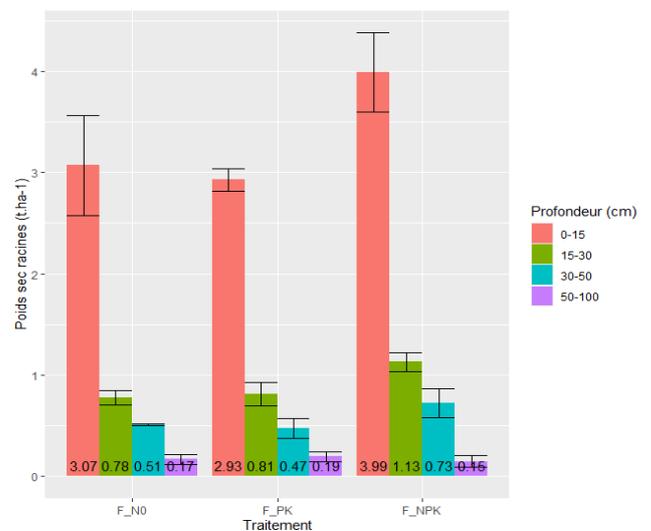


Figure 8 : Masse racinaire sèche du stock de racines en fonction du traitement et de l'horizon de sol.

Les POM (Particular Organic Matter, figure 9) de plus d'un mm ont été récupérées dans les carottes initiales. La majorité des POM se situe dans l'horizon 0-15 (69 %, 74 % et 77 % pour F_N0, F_PK et F_NPK respectivement), et une augmentation de la quantité de POM se voit le long du gradient de fertilisation (non significatif). De plus, une relation linéaire est perceptible entre la masse de POM et la masse racinaire en figure 10.

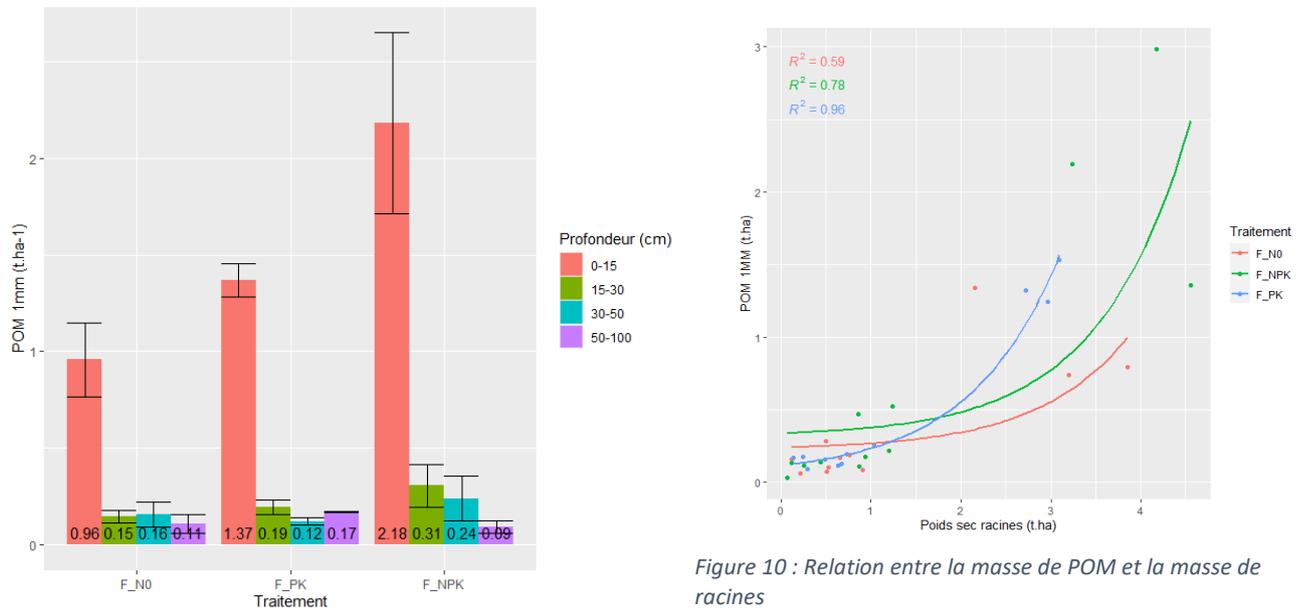


Figure 9 : Masse du stock de POM en fonction du traitement et de l'horizon de sol

Figure 10 : Relation entre la masse de POM et la masse de racines

1.1.b. Morphologie des racines

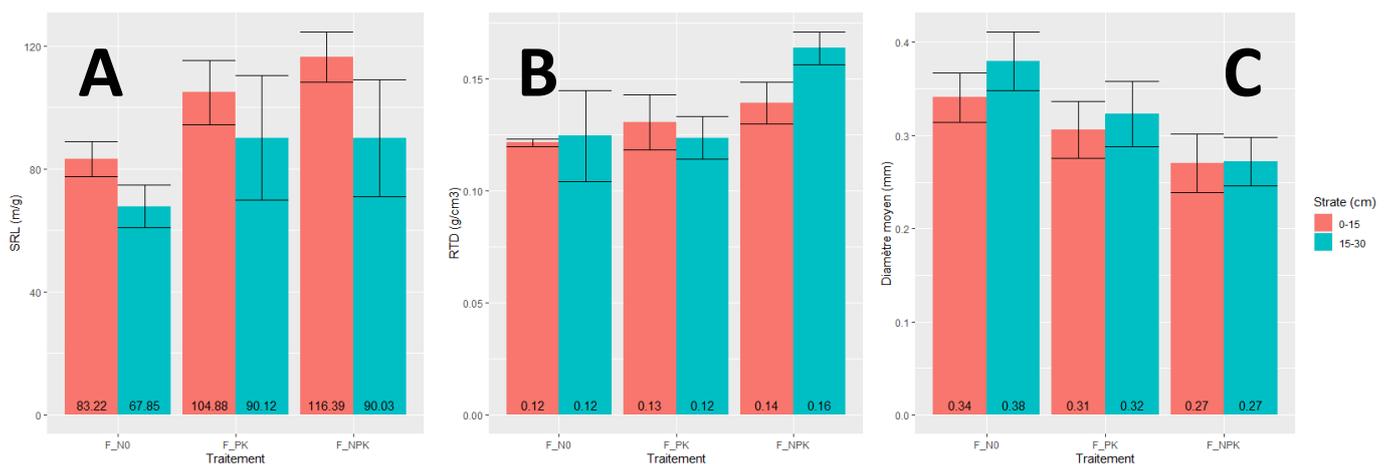


Figure 11 : Specific Root Length (SRL, A), Root Tissue Density (RTD, B) et Diamètre moyen (C) en fonction du traitement et sur deux strates

La SRL (Specific Root Length, figure 11A) augmente le long du gradient de fertilisation avec une plus forte SRL en F_NPK comparé à F_N0 de 30% quelle que soit la profondeur. Cependant, il ne s'agit que d'une tendance dans la mesure où une ANOVA montre une différence non significative, y compris entre F_N0 et F_NPK à l'horizon 0-15 ($p = 0.05688$, test t). La RTD (figure 11B) montre aussi une tendance à augmenter avec le gradient de fertilisation

(non significatif), tandis que le diamètre tend à baisser. Le diamètre moyen (figure 11C) est légèrement plus élevé dans l'horizon 15-30 que dans l'horizon 0-15, mais l'écart diminue à mesure que la fertilisation augmente.

2.2. Production de biomasse aérienne

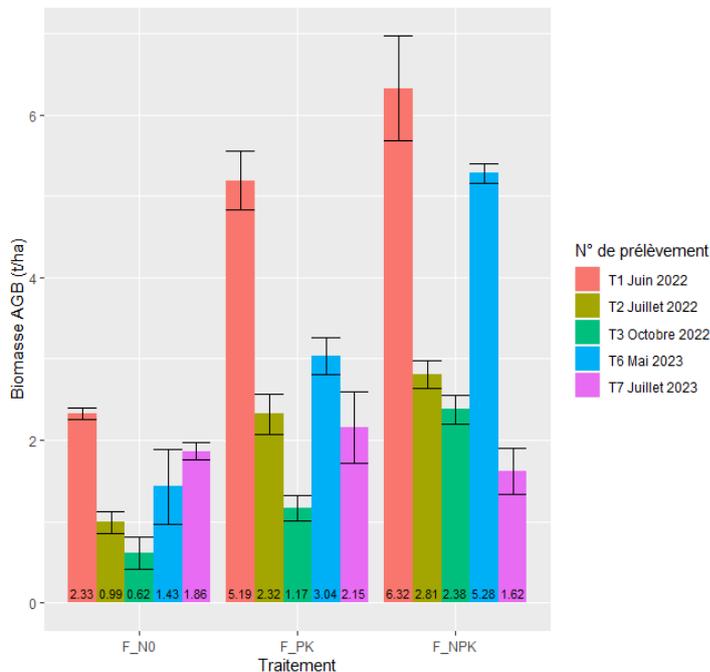


Figure 12 : Production moyenne de biomasse aérienne lors des différents prélèvements (fauches), par traitement

La figure 12 montre la production de biomasse de Juin 2022 à Juillet 2023. Les prélèvements T1 et T6 correspondent au pic de biomasse en fin de printemps. La production lors des pics de biomasse augmente le long du gradient de fertilisation. Le deuxième pic de végétation correspondant à T6 (2023) est nettement plus bas que celui de T1 (2022), avec exception pour la biomasse mesurée en juillet 2023 (T7) qui mesure la repousse entre mai et juillet qui n'est pas différente entre les 3 traitements.

Les productions de biomasses obtenues lors des autres prélèvements suivent également le gradient de fertilisation. Si, au prélèvement T1 la différence entre F_NPK et F_PK n'est pas significative, la biomasse en F_NPK est le triple de la biomasse en F_N0 ($p = 0,029$).

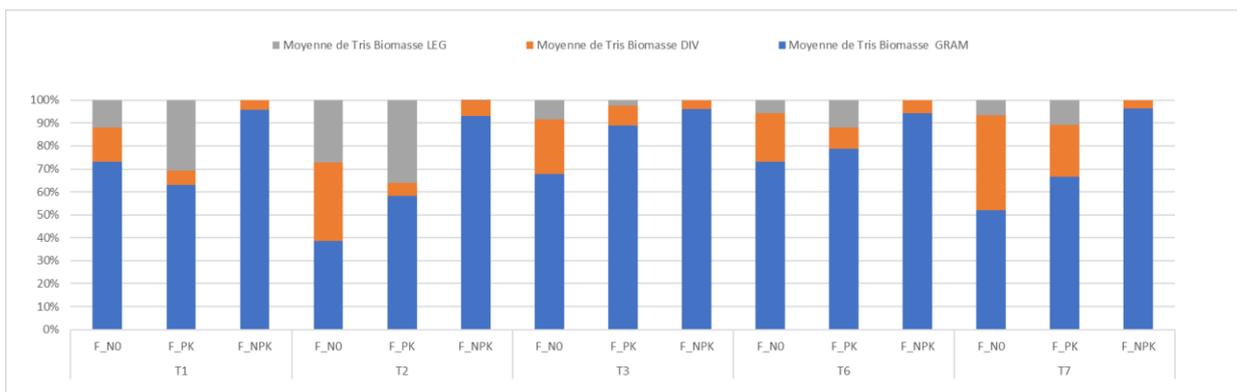


Figure 13 : Répartition des groupes fonctionnels (graminées, légumineuses et dicotylédones non légumineuses (divers)) dans chaque traitement lors de chaque prélèvement (fauche).

Les proportions de chaque groupe fonctionnel (Légumineuses, graminées et Dicotylédones non légumineuses, figure 13) pour chaque traitement et coupe de biomasse montrent que la proportion de graminées augmente le long du gradient de fertilisation, ainsi que celle de légumineuses, bien qu'elles soient absentes de la parcelle NPK, et celle de divers diminue. Ceci est valable pour les deux années de suivi.

2.3. Production racinaire (mesurée par la méthode IGC)

La production de racines dans la période d'Octobre 2022 à Mars 2023 (soit la période de repos de la végétation, Fig. 14A) ou en période de croissance de végétation (Mars – Juin Fig. 14B) est sensiblement identique sur les trois traitements, avec une tendance vers une plus forte production racinaire sur le traitement F_NPK que F_NO et F_PK dans la couche 0-15 cm (non significatif). La production est plus importante sur l'horizon 0-15 que sur l'horizon 15-30 ($p = 0.004$).

Lors de la période de reprise printanière de la végétation (Mars à Juin, figure 14B), la production en 0-15 est identique ($p = 0.52$) entre les traitements, mais un effet traitement est perceptible sur la strate 15-30 cm (non significatif)

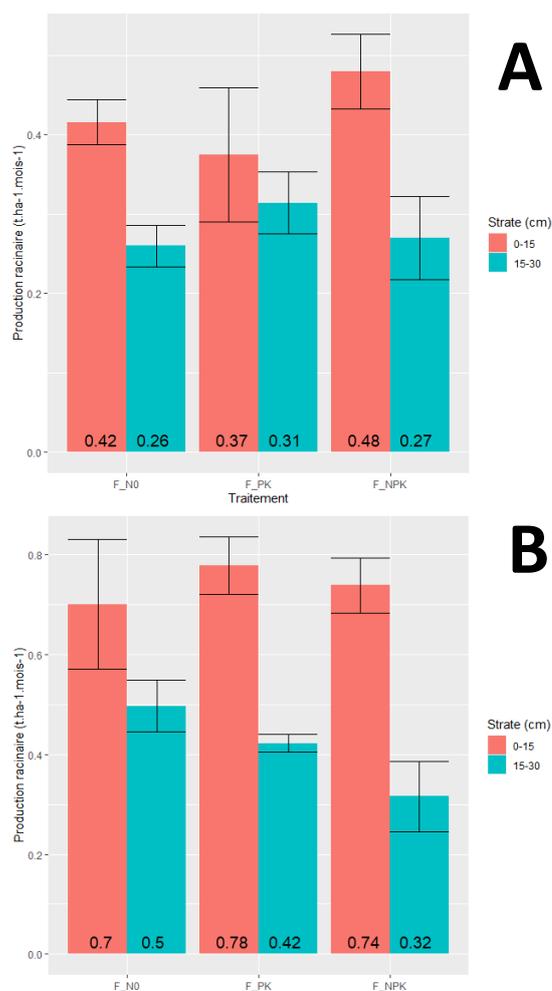


Figure 14 : Cinétique de production de racines en fonction du traitement et de la strate. A correspond à la production IGC 2 (Octobre-Mars), et B correspond à la production IGC 3 (Mars-Juin) (cf Figure 6)

La production est de l'ordre de 0,68, 0,68 et 0,75 t MS/ha/mois pour la période de repos de la végétation (Figure 13A) et de 1,2 ; 1,2 et 1,06 t MS/ha/mois pour la période de reprise de la végétation (Mars-Juin) (Figure 14B), pour respectivement les traitements F_NO, F_PK et F_NPK.

2.4. Root:shoot ratio

En utilisant des données annexes sur la production de biomasse aérienne en février réalisées sur le site (mais pas dans le cadre du projet), nous pouvons calculer un root:shoot ratio (tableau 3). Plus le résultat est élevé, plus la quantité de racines produite est supérieure à celle des parties aériennes (feuilles, gaines, tiges, fleurs).

Nous pouvons voir que le ratio est plus faible dans le traitement F_NPK sur les deux dates, mais les résultats sont plus incertains sur les deux traitements F_NO et F_PK. Les tests statistiques ne montrent pas de différence significative entre les deux traitements, mais une tendance est visible dans la date 3, avec un plus fort root:shoot sur le traitement F_NO.

Tableau 3 : Récapitulatif de la production moyenne t.ha⁻¹) pour chaque traitement, sur deux périodes, et root:shoot de production.

| Traitement | Date 2 (Octobre à Mars) | | | Date 3 (Mars à Juin) | | | Production totale | | |
|------------|-------------------------|----------|------------------|----------------------|----------|------------------|-------------------|----------|----------|
| | Production | | Root:Shoot ratio | Production | | Root:Shoot ratio | Racinaire | Aérienne | RS moyen |
| | Racinaire | Aérienne | | Racinaire | Aérienne | | | | |
| F_NO | 3,041 | 0,027 | 203,339 | 3,219 | 1,431 | 2,779 | 6,260 | 1,458 | 5,092 |
| F_PK | 3,099 | 0,021 | 488,965 | 3,224 | 3,040 | 1,071 | 6,323 | 3,054 | 2,079 |
| F_NPK | 3,370 | 0,062 | 56,745 | 2,833 | 5,279 | 0,535 | 6,204 | 5,321 | 1,166 |

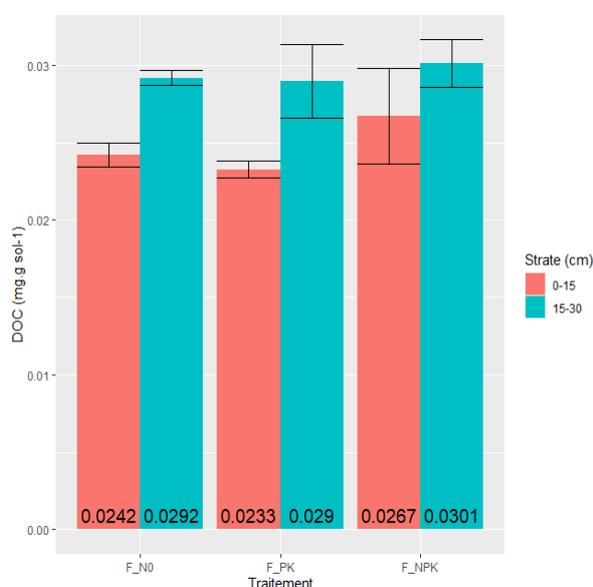


Figure 15 : DOC de chaque traitement et strate

Les exsudats racinaire (figure 15), suivis sous forme de teneurs en DOC (Dissolved Organic Carbon) à partir des extractions des sol fins des IGC sur la date 2 (Octobre à Mars), montrent des teneurs sont globalement faibles, ne dépassant pas 0.03 mg.g sol⁻¹, qui sont semblables d'un traitement à l'autre et qui ne montrent une différence entre les deux horizon, l'horizon 15-30 étant plus riche en DOC

VI.3. Effet de la diversité

Impact de la diversité spécifique, c'est-à-dire la comparaison entre un couvert en monoculture et un couvert multi espèces (comprenant une espèce en commun avec la monoculture, la fétuque)

3.1. Impact de la diversité sur l'état initial

1.1.c. Stock de racines

Le stock de racines (figure 16) montre une quantité de racines plus importante (17% mais non significatif, $p = 0,99$) dans l'horizon 0-15 du traitement F_NPK, mais il n'y a pas de différence notable entre chaque horizon. Il n'y a pas de donnée pour le dernier horizon des parcelles de fétuque en raison de cailloux empêchant le carotteur de prélever la carotte entière. Le stock de racine cumulé sur la strate 0-50 cm est de 5.18 et 5.85 t.ha⁻¹ pour la monoculture et la diversité respectivement.

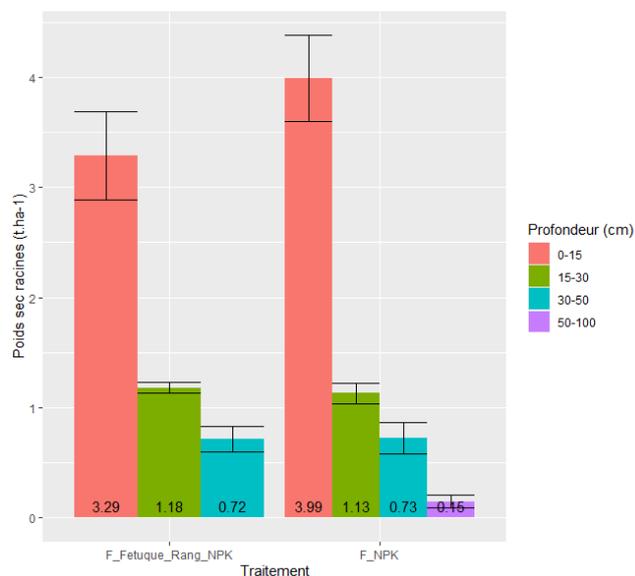


Figure 16 : Masse du stock de racines en fonction de la diversité, pour chaque strate

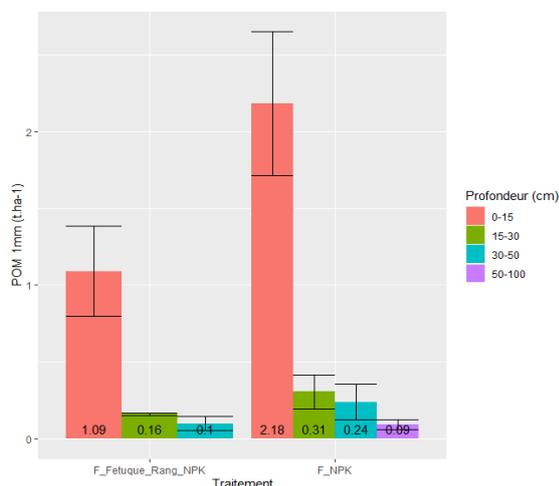


Figure 17 : Masse du stock de POM en fonction de la diversité, pour chaque strate

La masse de POM est plus importante (non significatif, $p = 0.87$) dans le traitement de diversité, avec une masse deux fois plus importante sur chaque horizon (non significatif) (figure 17). Les POM sont, là aussi, concentrées dans l'horizon le moins profond (80,7% et 77,3% pour la monoculture et le traitement diversifié, respectivement)

1.1.b. Morphologie racinaire

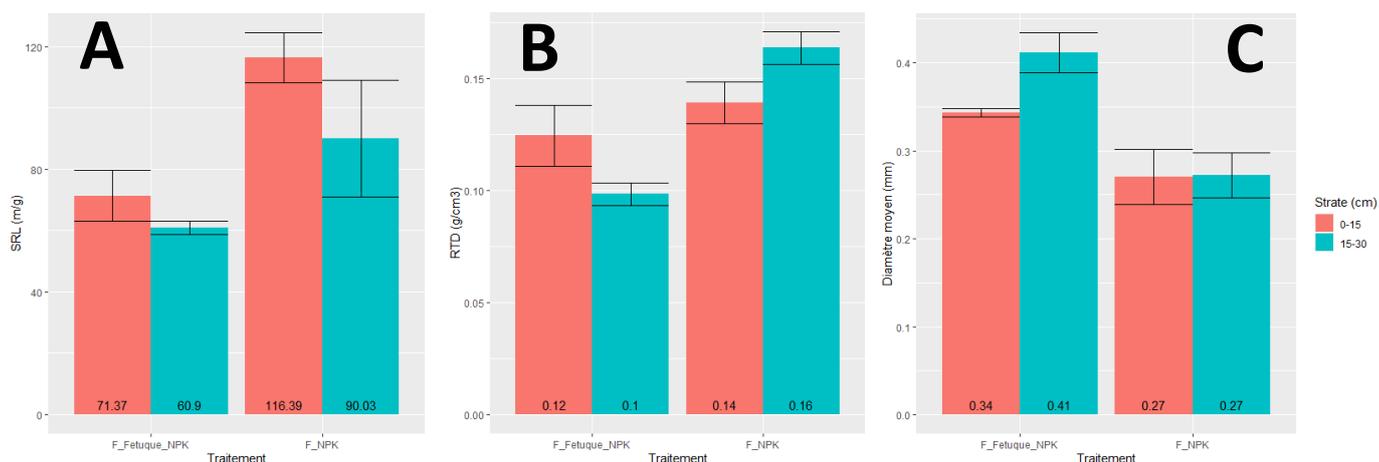


Figure 18 : Figure 10 : SRL (A), RTD (B) et Diamètre moyen (C) en fonction de la diversité et de la strate

La SRL (figure 18A) de la monoculture est plus faible (38% pour 0-15, 32% pour 15-30) que celle de la parcelle NPK, sans différence significative ($p = 0.08$ pour 0-15, $p = 0.32$ pour 15-30). La RTD (figure 18B) est similaire entre les deux traitements sur l'horizon 0-15 ($p = 0.69$), mais diffère sur l'horizon 15-30 ($p = 0.004$) avec une augmentation de 37,5% en prairie diversifiée. Le diamètre (figure 18 en monoculture est supérieur ($p=0.001$) de 20% sur l'horizon 0-15 et de 34% sur l'horizon 15-30.

3.2. Production de biomasse aérienne

En comparant les valeurs de biomasses (figure 19) entre la monoculture et F_NPK (prairie multi-espèces), nous pouvons observer que les valeurs sont sensiblement les mêmes entre les deux traitements, à l'exception du prélèvement T7, plus faible sur la parcelle diversifiée que sur la monoculture, et du prélèvement T4, plus faible en milieu diversifié.

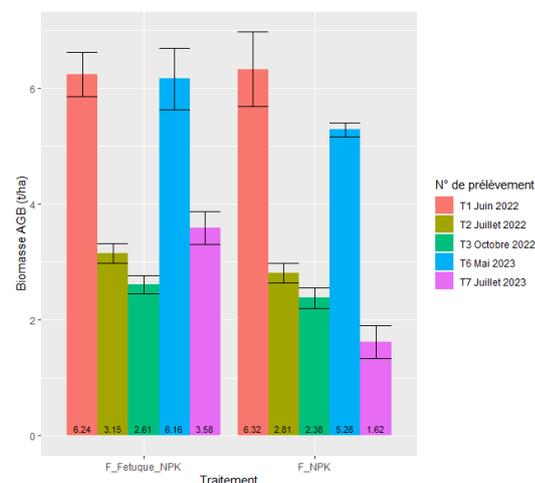


Figure 19 : Production de biomasse aérienne au cours de chaque prélèvement en fonction de la diversité

3.3. Production de biomasse racinaire

La production racinaire lors de la période de repos de la végétation (Octobre-Mars, Figure 20A) est plus importante dans le traitement F_NPK que dans la monoculture (0.51 et 0.75 t.ha⁻¹ respectivement, $p = 0,029$), avec une production plus forte dans la strate supérieure pour chaque traitement (60% de la production en monoculture, 65% de la production en F_NPK, $p = 0,061$)

Lors de la période de production de la végétation (Mars-Juin, Figure 20B), la monoculture est plus productive que le traitement F-NPK (1,28 et 1,06 t.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement, p = 0.043), avec la strate supérieure là aussi plus productive que la strate inférieure (61% en monoculture et 69% en F_NPK, p = 8,57e⁻⁰⁵)

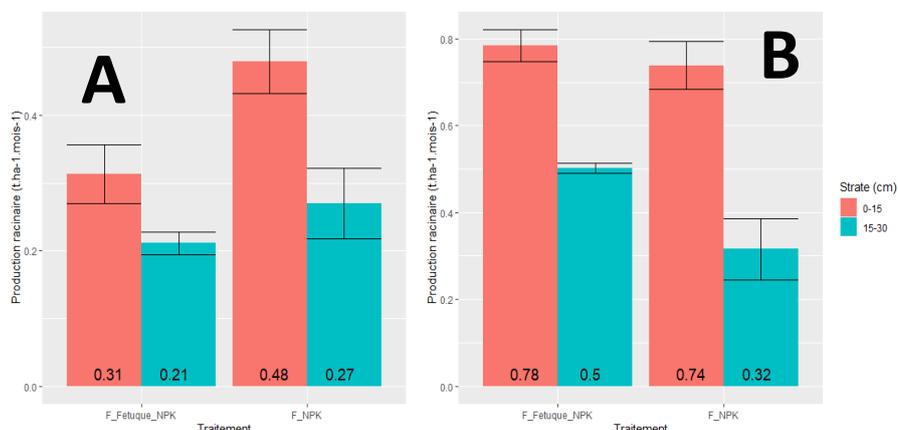


Figure 20 : Production racinaire en fonction de la diversité et de la strate, en hiver (Octobre à Mars, A) et au printemps (Mars à Juin, B)

Le Root:shoot (tableau 4) dans le traitement de diversité est nettement plus élevé que dans la monoculture, bien que le manque de données en hiver fausse légèrement le résultat. Cependant, la production aérienne en hiver est bien plus faible qu'au printemps, ce qui laisse penser que les valeurs obtenues en production totale sur les deux périodes cumulées sont proches de la réalité.

Tableau 4 : Récapitulatif de la production moyenne pour chaque traitement en t.ha⁻¹, sur deux périodes. N/A indique une absence de données, un astérisque indique une incertitude sur le résultat qui découle de ce manque de données

| Traitement | Date 2 (Octobre à Mars) | | Root:Shoot ratio | Date 3 (Mars à Juin) | | Root:Shoot ratio | Production totale | | |
|----------------|-------------------------|----------|------------------|----------------------|-------|------------------|-------------------|----------|----------|
| | Production | | | Production | | | Racinaire | Aérienne | RS moyen |
| | Racinaire | Aérienne | Racinaire | Aérienne | | | | | |
| F_Fetouque_NPK | 2,362 | N/A | N/A | 3,460 | 6,157 | 0,569 | 5,821 | 6,157* | 0,688* |
| F_NPK | 3,370 | 0,062 | 56,745 | 2,833 | 5,279 | 0,535 | 6,204 | 5,321 | 1,166 |

La DOC (figure 21) est sensiblement identique sur toutes les strates et tous les traitements ($p = 0,257$ traitement, $p = 0.132$ strate). On observe tout de même une tendance vers une plus forte teneur en DOC sur l'horizon plus profond.

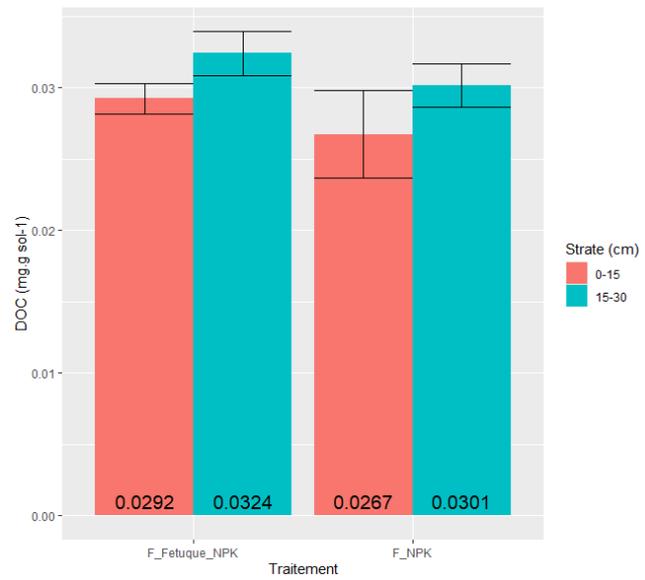


Figure 21 : DOC en fonction de la diversité et de la strate

VII. Discussion

Le but de ce stage était d'identifier le rôle des racines, et plus en détail les caractéristiques racinaire (croissance et morphologie) en lien avec la gestion agricole, sur le stockage de carbone dans le sol des prairies. L'étude se base sur un suivi des croissance (production) de biomasse aérienne et racinaire en comparant i) l'effet de gradient de fertilisation (effet indirect sur la diversité et le fonctionnement du couvert végétal) et ii) la diversité (multi-espèces vs mono culture) sur 2 ans.

VII.1. Discussion des résultats, au vu des hypothèses

Les résultats obtenus sur le stock de racines sont validés par ce qui a été trouvé dans la littérature. La majorité de la biomasse se situant dans l'horizon 0-15 correspond à ce qui a été trouvé par Mueller et al. (2013), Skinner et al. (2010), Nie et al. (2010), et la fertilisation impacte les traits racinaires, comme anticipé. La SRL augmente avec le gradient de fertilisation, permettant une meilleure absorption de nutriments. Le diamètre plus élevé dans l'horizon 0-15 cm du traitement F_N0, et le diamètre peu différent entre les deux horizons dans le traitement F_NPK est à l'opposé des résultats de Fort et al (2016), car un diamètre plus élevé permet un meilleur transport de l'eau (Hernández et al. 2010) qui est nécessaire au maintien d'une très forte production aérienne typique d'une forte fertilisation. Cependant, comme vu dans la figure 13, la composition des traitements F_N0 et F_PK est plus riche en dicotylédones et légumineuses, dont la racine pivot pourrait avoir tiré le diamètre moyen vers une valeur plus élevée, que le traitement F_NPK, qui est surtout composé de graminées qui ont un système racinaire filamenteux. Concernant la RTD, on aurait pu s'attendre à voir une plus forte RTD dans le traitement F_N0 comparé au traitement F_NPK, mais il n'y a aucune différence significative. *Globalement, nous pouvons voir un effet de la fertilisation sur le stock racinaire et sur la morphologie des racines, avec une masse plus importante et une stratégie racinaire plus orientée vers l'exploitation et un turn-over important plus la fertilisation augmente. La fertilisation impacte la diversité fonctionnelle des prairies, ce qui valide l'hypothèse 2.*

La biomasse aérienne montre également une réponse positive à la fertilisation, avec une augmentation plus forte de la production en cas d'addition de PK, et une augmentation encore plus forte en présence de NPK, ce qui est validé par la littérature. La fertilisation avec l'azote augmente la biomasse aérienne de 50 à 70% dans l'étude de Rose et al. (2011) et de 40% selon Fay et al. (2015), bien moins que dans nos résultats (une augmentation de 170% entre F_N0 et F_NPK, figure 12). Au cours de l'année, la production printanière fin mai (T6) et début juin (T1) est plus importantes que celle des repousses d'été (T2, T7) et d'automne (T3). La réduction de biomasse sur le prélèvement T6 comparé au prélèvement T1 pourrait être attribué

à la pluviométrie différente d'une année sur l'autre. La différence de date de prélèvement pourrait également jouer, car le pic de biomasse s'accompagne de la production des épis, ce qui fait varier de façon très importante la biomasse aérienne. Seule la monoculture n'a pas été affectée, ce qui peut être expliqué par la robustesse de *Festuca sp* face aux conditions climatiques (Barkaoui et Voltaire 2023). *Néanmoins, la production de biomasse aérienne est plus importante sur le traitement F_NPK que sur le traitement F_PK, lui-même plus productif que le traitement F_NO, bien que les tests ne montrent une différence significative qu'entre F_NO et F_NPK.*

Peng et al. (2017) ainsi que Lu et al (2011) montrent qu'un ajout d'azote réduit la production de racines pour favoriser la production de biomasse aérienne, parce qu'il n'est pas nécessaire d'investir plus de carbone pour augmenter l'absorption de carbone, ce qui correspond aux résultats de que nous avons trouvé au vu des ratios root:shoot. Cela se voit également dans l'aspect morphologie : les racines venant du traitement F_NPK montrent une SRL élevée, ce qui est caractéristique d'une maximisation de la capacité à absorber des nutriments en investissant un minimum de ressources sous le sol. La production racinaire ne changeant pas entre les saisons, et n'étant pas différente d'un traitement à l'autre, il est surprenant que la masse du stock de racines soit si différente entre les traitements. En effet, la SRL est également caractéristique d'une durée de vie racinaire faible et d'un turn-over rapide, ce qui devrait limiter la croissance des racines sur le long terme. Cependant, les périodes traitées ne couvrent pas l'été, période durant laquelle les productions racinaires et aériennes sont réduites, mais sont peut-être plus élevées pour les traitements F_NPK car il s'agit majoritairement de pools de graminées divers, moins sensibles à la chaleur que les légumineuses que l'on retrouve surtout en F_NO et F_NPK (figure 12). La différence de production annuelle s'effectue donc peut-être à cette période. *Les résultats montrent toutefois que la production de biomasse racinaire n'est pas différente entre les traitements de fertilisation, ce qui invalide en partie l'hypothèse 1 ; La production de biomasse aérienne est impactée par la fertilisation, mais pas la production racinaire. Ce qui montre qu'une augmentation de de nutriments n'est pas nécessairement un moyen d'augmenter la production racinaire en prairie permanente car la production est identique en prairie pauvre et en prairie riche. L'hypothèse 3 est validée, la morphologie racinaire est orientée vers l'exploitation en présence de fertilisant.*

Il est intéressant de noter que les conditions du sol sont semblables sur l'ensemble du site, ce qui veut dire que les différences observées au niveau racinaire sont le fruit des différences entre communautés végétales, elles-mêmes provenant de la fertilisation, sans que celle-ci n'impacte véritablement la biomasse racinaire.

L'intérêt de mesurer la teneur en DOC est de quantifier le carbone directement disponible pour les micro-organismes du sol, car il s'agit du substrat privilégié en raison de sa facilité de dégradation par ces derniers (Marschner et Bredow 2002), et est souvent d'origine végétale sous forme d'exsudats racinaires. Les enzymes sécrétées par les micro-organismes vont non seulement dégrader ce carbone labile, mais également dégrader la matière organique récalcitrante suivant ce qui s'appelle le Rhizosphere priming effect (RPE). Les valeurs particulièrement basses que nous avons trouvées sur la période de repos de la végétation, et leur uniformité, laisse penser qu'il s'agit d'un bruit de fond qui n'a pas de lien avec l'activité photosynthétique des plantes, source des composés de l'exsudat racinaire (Lynch & Whipps 1990). Lors de périodes plus actives photosynthétiquement, nous pourrions nous attendre à une plus forte production d'exsudat le long du gradient de fertilisation pour la période production de végétation, comme dans l'étude de Lu et al (2023).

Les POM sont une forme de carbone particulièrement labile, qui se dégrade d'autant plus vite à mesure que leur taille augmente (Besnard et al. 1997) et que les nutriments limitants (N, P et K pour faciliter l'assimilation) sont disponibles (Ochoa-Hueso et al. 2020). Une plus forte production de POM liée à une plus forte masse racinaire (figure 9) indiquerait donc une meilleure capacité à stocker du carbone.

Fornara et Tilman (2012) montrent qu'une diversité spécifique élevée augmente le stockage de carbone par la production de plus de racines, comparé à une monoculture, mais moins que l'ajout d'azote (au prix d'une plus faible diversité). Si, dans nos résultats, nous n'avons pas de différence significative dans le stock de racines entre monoculture et diversité, nous voyons tout de même un stock de racines plus fort dans le traitement NPK que dans le traitement N0. Cependant, l'ajout d'azote réduit la masse microbienne du sol et donc la capacité de la matière organique à être dégradée (Zhang et al. 2018), ce qui devrait réduire la capacité du sol à stocker du carbone comme le montrent Sillen et al (2012) ou He et al (2013).

Concernant l'aspect diversité, il semble qu'une parcelle diversifiée est plus productive qu'une monoculture, avec un investissement dans le sol plus important dans la parcelle diversifiée (tableau 4). La SRL plus élevée en diversité et la masse de POM plus importante suggèrent un turn-over plus important, et donc un dépôt de nécromasse et ainsi de carbone plus important dans le sol comparé à la monoculture. *L'état initial est semblable cependant, à l'exception de la masse de POM, ce qui ne nous permet pas de conclure totalement sur l'hypothèse 4. La productivité de la parcelle diversifiée est plus importante compte-tenu de la production racinaire plus importante en hiver, ce qui valide l'hypothèse 5. Les traits différents nous permettent de valider l'hypothèse 6.*

VII.2. Aspects méthodologiques

2.1. Méthode des Ingrowth Core

Il n'y a malheureusement pas de méthode parfaite pour quantifier la production racinaire.

La difficulté de la méthode des Ingrowth core utilisée ici est le temps nécessaire au lavage des racines (entre une et deux heures). La terre et les cailloux sont faciles à séparer de la masse racinaire, mais les débris organiques (POM, racines mortes) demandent jusqu'à deux heures de prélèvement avec une paire de pinces fines, problème également évoqué par Pérez-Harguindeguy et al. (2013). Quelques articles des années 2000 montrent qu'une humidité et une densité de sol plus faibles que le sol environnant n'impacte pas la pousse des racines à l'intérieur du filet (Steingrobe et al. 2000). Il aurait donc été envisageable de sécher et tamiser le sol mis dans les IGC très finement afin de s'assurer que toutes les particules organiques d'une taille de plus d'un millimètre sont éliminées, permettant un lavage et un traitement des IGC bien plus rapide. De plus, les prélèvements répétés causent un agrandissement du trou dans lequel les IGC sont placés, créant au fil du temps une augmentation non négligeable du volume des carottes de sol (Figure 22) pouvant impacter les résultats futurs. La mesure est de plus limitée à la profondeur de l'IGC, mais reste malgré tout une méthode peu chère et facile à mettre en place permettant d'obtenir des données de production racinaire.

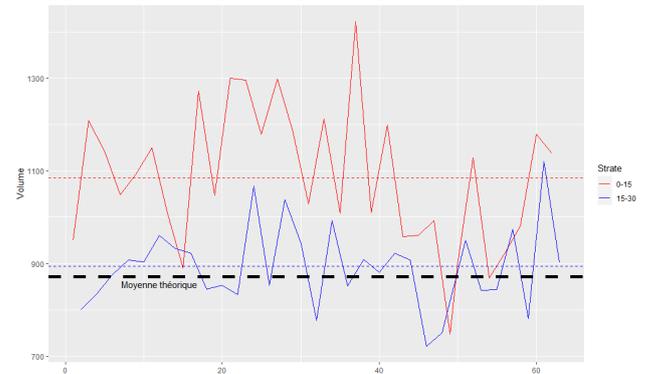


Figure 22 : Volume des carottes de sol pour les deux strates. Les pointillés indiquent le volume moyen pour chaque strate, et le trait noir en pointillé indique le volume théorique. Le volume de l'horizon 0-15 est significativement supérieur à la théorie

Les méthodes pour analyser les parties souterraines des plantes sont peu nombreuses et présentent toutes des avantages et des défauts, et souffrent du manque d'uniformisation des protocoles dont bénéficient les méthodes d'analyse des parties aériennes (Birouste 2014). Le prélèvement entraîne inévitablement une perte des racines les plus fines (Frank et al. 2018) et, étant une méthode destructive, pourrait entraîner une réponse des racines. D'autres méthodes comme le marquage par divers isotopes radioactifs (carbone 14 ou carbone 13), ou non destructives comme le mini-rhizotron existent. Le marquage peut être réalisé en continu ou en flash, mais la première méthode n'est adaptable qu'à des plantes en pot, qui ne montrent pas la complexité des interactions en conditions réelles, et la deuxième méthode sera appliquée au cours du projet mais sur des échantillons réduits. Le mini-rhizotron permet d'obtenir des données de morphologie sans destruction et donc sans perturbation des plantes, mais ne permet pas d'obtenir la biomasse.

2.2. Dispositif d'étude de diversité

Le dispositif nous permettant d'étudier la diversité est rudimentaire, car il aurait fallu une monoculture par espèce présente dans la prairie fertilisée. En effet, la production de la pluri-culture est le reflet de la production de chaque espèce, plus ou moins influencée par les phénomènes de compétitivité, inhibition compétitive ou complémentarité. Il aurait donc fallu mesurer la productivité de chaque espèce en monoculture et mesurer leur contribution en pluri-culture. Cela aurait cependant augmenté de façon drastique la masse de travail, et n'était donc pas envisageable dans le cadre de ce projet. Malgré tout, *Festuca arudinacea* est un genre connu pour être très productif, et il est donc envisageable de supposer que nous aurions observé une production plus importante en diversité qu'en monoculture même avec un dispositif complet.

VIII. Conclusion :

Nous avons donc vu que la fertilisation permet d'obtenir une masse racinaire plus importante comparé à une absence de celle-ci, et à niveau de fertilisation égal, une plus grande diversité donne lieu à une plus forte production de racines et à un plus grand stock de racines. La production de racines, cependant, est identique quel que soit le traitement, ce qui est incohérent avec le stock plus important, ce qui laisse penser que pour séquestrer le carbone, il n'est pas nécessaire de fertiliser. En dépit d'une absence de données sur le carbone dans le sol, la bibliographie nous laisse penser qu'une prairie fertilisée permettra une plus forte séquestration de carbone compte tenu des teneurs en POM et de la morphologie racinaire qui permet un renouvellement de racines plus rapide. Cependant, un débat nécessaire est en cours sur les risques causés par les pertes d'azote non assimilé vers les compartiments aériens et aquatiques, et sur le risque encouru par les prairies à cause de la baisse de diversité causée par la fertilisation.

Informations annexes :

Activités annexes : Mentionné ici brièvement, j'ai également participé à une présentation du projet MixRoot sur le dispositif expérimental de Theix dans le cadre du séminaire national pour les animateurs des groupes d'agriculteurs en polyculture-élevage et grandes cultures du réseau DEPHY ferme du projet Ecophyto. (Annexe 1)

En figure 23, la répartition du temps de travail au cours du stage. Les manipulations en laboratoire ont occupé près de la moitié du temps de travail. Le travail de bureau s'est composé de bibliographie en majorité et de la rédaction du rapport. La catégorie autres est composée de formations personnelles, d'accompagnement et de formation de techniciens en CDD ayant participé au projet, et de réunions.

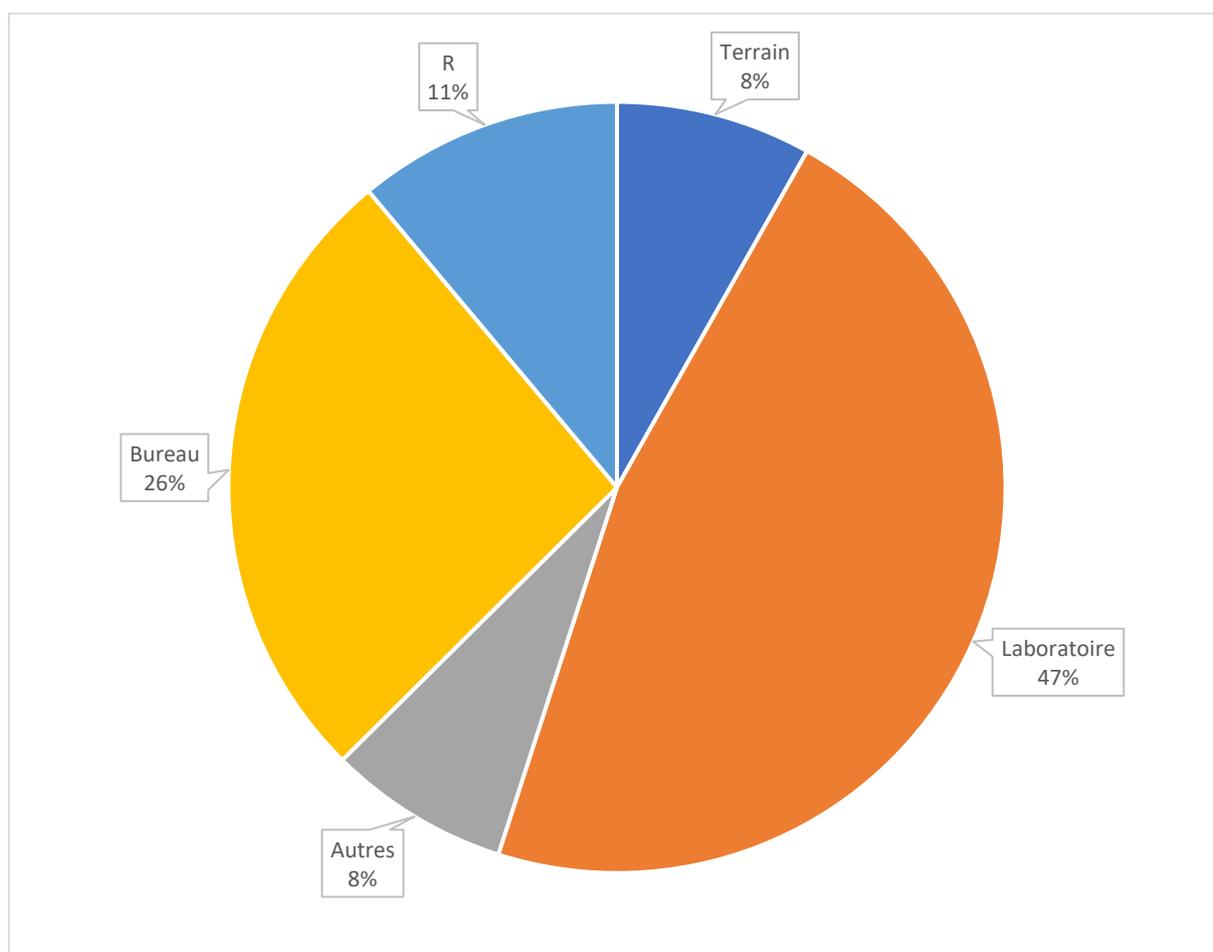


Figure 23 : Répartition du temps de travail au cours du stage

Références bibliographiques

- « 4 pour 1000 | Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire ». Consulté le 8 août 2023. <https://agriculture.gouv.fr/mots-cles/4-pour-1000>.
- 223438@au.dk. « EJP SOIL - Towards Climate-Smart Sustainable Management of Agricultural Soils », 10 juillet 2023. <https://eipsoil.eu/>.
- Allison, L. E. « Organic Carbon ». In *Methods of Soil Analysis*, 1367-78. John Wiley & Sons, Ltd, 1965. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c39>.
- Aydin, I., et F. Uzun. « Nitrogen and Phosphorus Fertilization of Rangelands Affects Yield, Forage Quality and the Botanical Composition ». *European Journal of Agronomy* 23, n° 1 (juillet 2005): 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.08.001>.
- Bai, Yongfei, et M. Francesca Cotrufo. « Grassland Soil Carbon Sequestration: Current Understanding, Challenges, and Solutions ». *Science* 377, n° 6606 (5 août 2022): 603-8. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>.
- Baldock, J.A, et J.O Skjemstad. « Role of the Soil Matrix and Minerals in Protecting Natural Organic Materials against Biological Attack ». *Organic Geochemistry* 31, n° 7-8 (juillet 2000): 697-710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8).
- Bardgett, Richard D., Liesje Mommer, et Franciska T. De Vries. « Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes ». *Trends in Ecology & Evolution* 29, n° 12 (1 décembre 2014): 692-99. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>.
- Basile-Doelsch, Isabelle, Jérôme Balesdent, et Sylvain Pellerin. « Reviews and Syntheses: The Mechanisms Underlying Carbon Storage in Soil ». Preprint. Biogeochemistry: Soils, 19 février 2020. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-49>.
- Bengtsson, J., J. M. Bullock, B. Egoh, C. Everson, T. Everson, T. O'Connor, P. J. O'Farrell, H. G. Smith, et R. Lindborg. « Grasslands—More Important for Ecosystem Services than You Might Think ». *Ecosphere* 10, n° 2 (2019): e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>.
- Besnard, E., C. Chenu, J. Balesdent, P. Puget, et D. Arrouays. « Fate of Particulate Organic Matter in Soil Aggregates during Cultivation ». *European Journal of Soil Science* 47, n° 4 (1996): 495-503. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01849.x>.
- Bielecki, R. L. « Phosphate Pools, Phosphate Transport, and Phosphate Availability ». *Annual Review of Plant Physiology* 24, n° 1 (1973): 225-52. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.001301>.
- Birouste, Marine. « Impact des traits racinaires sur les composantes du stockage de carbone : du fonctionnement de l'espèce à celui de la communauté ». These de doctorat, Montpellier, SupAgro, 2014. <https://www.theses.fr/2014NSAM0017>.
- Birouste, Marine, Ezequiel Zamora Ledezma, Carine Bossard, Ignacio Perez-Ramos, et Catherine Roumet. « Measurement of fine root tissue density: A comparison of three methods reveals the potential of root dry matter content ». *Plant and Soil* 374 (2 août 2013). <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1874-y>.
- Chen, Songchao, Dominique Arrouays, Denis A. Angers, Manuel P. Martin, et Christian Walter. « Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept ». *Soil and Tillage Research, Soil Carbon and Climate Change: the 4 per Mille Initiative*, 188 (1 mai 2019): 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>.
- Clark, Christopher M., et David Tilman. « Loss of Plant Species after Chronic Low-Level Nitrogen Deposition to Prairie Grasslands ». *Nature* 451, n° 7179 (février 2008): 712-15. <https://doi.org/10.1038/nature06503>.
- Cotrufo, M. Francesca, et Jocelyn M. Lavallee. « Chapter One - Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration ». In *Advances in Agronomy*, édité par Donald L. Sparks, 172:1-66. Academic Press, 2022. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>.
- Crowther, T. W., J. van den Hoogen, J. Wan, M. A. Mayes, A. D. Keiser, L. Mo, C. Averill, et D. S. Maynard. « The global soil community and its influence on biogeochemistry ». *Science* 365, n° 6455 (23 août 2019): eaav0550. <https://doi.org/10.1126/science.aav0550>.
- Diaz, S., J.g. Hodgson, K. Thompson, M. Cabido, J.h.c. Cornelissen, A. Jalili, G. Montserrat-Martí, et al. « The Plant Traits That Drive Ecosystems: Evidence from Three Continents ». *Journal of Vegetation Science* 15, n° 3 (2004): 295-304. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x>.
- Dixon, A. P., D. Faber-Langendoen, C. Josse, J. Morrison, et C. J. Loucks. « Distribution Mapping of World Grassland Types ». *Journal of Biogeography* 41, n° 11 (2014): 2003-19. <https://doi.org/10.1111/jbi.12381>.
- Dungait, Jennifer A. J., David W. Hopkins, Andrew S. Gregory, et Andrew P. Whitmore. « Soil Organic Matter Turnover Is Governed by Accessibility Not Recalcitrance ». *Global Change Biology* 18, n° 6 (2012): 1781-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>.
- Eusterhues, Karin, Julia Neidhardt, Anke Hädrich, Kirsten Küsel, et Kai Uwe Totsche. « Biodegradation of Ferrihydrite-Associated Organic Matter ». *Biogeochemistry* 119, n° 1 (1 juin 2014): 45-50. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9943-0>.

- Fay, Philip A., Suzanne M. Prober, W. Stanley Harpole, Johannes M. H. Knops, Jonathan D. Bakker, Elizabeth T. Borer, Eric M. Lind, et al. « Grassland Productivity Limited by Multiple Nutrients ». *Nature Plants* 1, n° 7 (6 juillet 2015): 1-5. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.80>.
- Fontaine, Sébastien, Sébastien Barot, Pierre Barré, Nadia Bdioui, Bruno Mary, et Cornelia Rumpel. « Stability of Organic Carbon in Deep Soil Layers Controlled by Fresh Carbon Supply ». *Nature* 450, n° 7167 (novembre 2007): 277-80. <https://doi.org/10.1038/nature06275>.
- Fort, Florian, Pablo Cruz, Eric Lecloux, Leandro Bittencourt de Oliveira, Ciprian Stroia, Jean-Pierre Theau, et Claire Jouany. « Grassland Root Functional Parameters Vary According to a Community-Level Resource Acquisition–Conservation Trade-Off ». *Journal of Vegetation Science* 27, n° 4 (2016): 749-58. <https://doi.org/10.1111/jvs.12405>.
- Fornara, Dario A., et David Tilman. « Soil Carbon Sequestration in Prairie Grasslands Increased by Chronic Nitrogen Addition ». *Ecology* 93, n° 9 (2012): 2030-36. <https://doi.org/10.1890/12-0292.1>.
- Frank, Douglas A., Alyssa W. Pontes, Eleanor M. Maine, Julie Caruana, Ramesh Raina, Surabhi Raina, et Jason D. Fridley. « Grassland Root Communities: Species Distributions and How They Are Linked to Aboveground Abundance ». *Ecology* 91, n° 11 (novembre 2010): 3201-9. <https://doi.org/10.1890/09-1831.1>.
- Freschet, Grégoire T., William K. Cornwell, David A. Wardle, Tatyana G. Elumeeva, Wendan Liu, Benjamin G. Jackson, Vladimir G. Onipchenko, Nadejda A. Soudzilovskaia, Jianping Tao, et Johannes H.C. Cornelissen. « Linking Litter Decomposition of Above- and below-Ground Organs to Plant–Soil Feedbacks Worldwide ». *Journal of Ecology* 101, n° 4 (2013): 943-52. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12092>.
- Gerle, Flavie. « Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse à la fertilisation ». Other, IUT de Saint-Etienne, 2020. <https://hal.inrae.fr/hal-04069037>.
- Gos, Pierre, Grégory Loucougaray, Marie-Pascale Colace, Cindy Arnoldi, Stéphanie Gaucherand, Daphné Dumazel, Lucie Girard, Sarah Delorme, et Sandra Lavorel. « Relative Contribution of Soil, Management and Traits to Co-Variations of Multiple Ecosystem Properties in Grasslands ». *Oecologia* 180, n° 4 (1 avril 2016): 1001-13. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3551-3>.
- He, Nianpeng, Qiang Yu, Ruomeng Wang, Yunhai Zhang, Yang Gao, et Guirui Yu. « Enhancement of Carbon Sequestration in Soil in the Temperature Grasslands of Northern China by Addition of Nitrogen and Phosphorus ». *PLOS ONE* 8, n° 10 (10 octobre 2013): e77241. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077241>.
- Hernández, E. I., A. Vilagrosa, J. G. Pausas, et J. Bellot. « Morphological Traits and Water Use Strategies in Seedlings of Mediterranean Coexisting Species ». *Plant Ecology* 207, n° 2 (1 avril 2010): 233-44. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9668-2>.
- Hungate, Bruce A., Edward B. Barbier, Amy W. Ando, Samuel P. Marks, Peter B. Reich, Natasja van Gestel, David Tilman, et al. « The economic value of grassland species for carbon storage ». *Science Advances* 3, n° 4 (5 avril 2017): e1601880. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601880>.
- « Impact of Nitrogen Deposition on the Species Richness of Grasslands ». Consulté le 17 août 2023. <https://doi.org/10.1126/science.1094678>.
- Jones, M. B., et Alison Donnelly. « Carbon Sequestration in Temperate Grassland Ecosystems and the Influence of Management, Climate and Elevated CO₂ ». *New Phytologist* 164, n° 3 (2004): 423-39. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01201.x>.
- Kleber, M., P. Sollins, et R. Sutton. « A Conceptual Model of Organo-Mineral Interactions in Soils: Self-Assembly of Organic Molecular Fragments into Zonal Structures on Mineral Surfaces ». *Biogeochemistry* 85, n° 1 (1 août 2007): 9-24. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5>.
- Kleber, Markus, Karin Eusterhues, Marco Keilueit, Christian Mikutta, Robert Mikutta, et Peter Nico. « Mineral–Organic Associations: Formation, Properties, and Relevance in Soil Environments ». *Advances in Agronomy* 130 (31 décembre 2015): 1-140. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>.
- Lal. « Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security », 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Lal, Rattan. « Carbon sequestration ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, n° 1492 (30 août 2007): 815-30. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.
- Lange, Markus, Nico Eisenhauer, Carlos A. Sierra, Holger Bessler, Christoph Engels, Robert I. Griffiths, Perla G. Mellado-Vázquez, et al. « Plant Diversity Increases Soil Microbial Activity and Soil Carbon Storage ». *Nature Communications* 6, n° 1 (7 avril 2015): 6707. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>.
- Lavorel, Sandra, Sandra Díaz, J. Hans C. Cornelissen, Eric Garnier, Sandy P. Harrison, Sue McIntyre, Juli G. Pausas, Natalia Pérez-Harguindeguy, Catherine Roumet, et Carlos Urcelay. « Plant Functional Types: Are We Getting Any Closer to the Holy Grail? » In *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, édité par Josep G. Canadell, Diane E. Pataki, et Louis F. Pitelka, 149-64. Global Change — The IGBP Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_13.

- Leuschner, Christoph, Stefanie Gebel, et Laura Rose. « Root Trait Responses of Six Temperate Grassland Species to Intensive Mowing and NPK Fertilisation: A Field Study in a Temperate Grassland ». *Plant and Soil* 373, n° 1 (1 décembre 2013): 687-98. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1836-4>.
- Li, Weibin, Xiaoling Gan, Yuan Jiang, Fengfeng Cao, Xiao-Tao Lü, Tobias Ceulemans, et Chuanyan Zhao. « Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus ». *Environmental Pollution* 309 (15 septembre 2022): 119720. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119720>.
- Lu, Jiayu, Liming Yin, Feike A. Dijkstra, Shaobin Yan, Peng Wang, et Weixin Cheng. « Linking plant traits to rhizosphere priming effects across six grassland species with and without nitrogen fertilization ». *Soil Biology and Biochemistry* 185 (1 octobre 2023): 109144. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109144>.
- Lu, Meng, Xuhui Zhou, Yiqi Luo, Yuanhe Yang, Changming Fang, Jiakuan Chen, et Bo Li. « Minor Stimulation of Soil Carbon Storage by Nitrogen Addition: A Meta-Analysis ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, n° 1 (30 janvier 2011): 234-44. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.010>.
- Lynch, J. M., et J. M. Whipps. « Substrate Flow in the Rhizosphere ». *Plant and Soil* 129, n° 1 (1 décembre 1990): 1-10. <https://doi.org/10.1007/BF00011685>.
- Masion, Armand, Astride Vilgé-Ritter, Jérôme Rose, William E. E. Stone, Brian J. Teppen, Danielle Rybacki, et Jean-Yves Bottero. « Coagulation-Flocculation of Natural Organic Matter with Al Salts: Speciation and Structure of the Aggregates ». *Environmental Science & Technology* 34, n° 15 (1 août 2000): 3242-46. <https://doi.org/10.1021/es9911418>.
- Mikutta, Christian. « X-ray absorption spectroscopy study on the effect of hydroxybenzoic acids on the formation and structure of ferrihydrite ». *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, n° 18 (15 septembre 2011): 5122-39. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.06.002>.
- Minasny, Budiman, Brendan P. Malone, Alex B. McBratney, Denis A. Angers, Dominique Arrouays, Adam Chambers, Vincent Chaplot, et al. « Soil carbon 4 per mille ». *Geoderma* 292 (15 avril 2017): 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- Mommer, Liesje, Jasper Van Ruijven, Hannie De Caluwe, Annemiek E. Smit-Tiekstra, Cornelis A.M. Wagemaker, N. Joop Ouborg, Gerard M. Bögemann, Gerard M. Van Der Weerden, Frank Berendse, et Hans De Kroon. « Unveiling Below-Ground Species Abundance in a Biodiversity Experiment: A Test of Vertical Niche Differentiation among Grassland Species ». *Journal of Ecology* 98, n° 5 (2010): 1117-27. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01702.x>.
- Müller, C., C. Kammann, J. C. G. Ottow, et H.-J. Jäger. « Nitrous Oxide Emission from Frozen Grassland Soil and during Thawing Periods ». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, n° 1 (2003): 46-53. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390011>.
- Mueller, Kevin E., David Tilman, Dario A. Fornara, et Sarah E. Hobbie. « Root Depth Distribution and the Diversity–Productivity Relationship in a Long-Term Grassland Experiment ». *Ecology* 94, n° 4 (2013): 787-93. <https://doi.org/10.1890/12-1399.1>.
- Nie, Z. N., S. Miller, G. A. Moore, B. F. Hackney, S. P. Boschma, K. F. M. Reed, M. Mitchell, et al. « Field Evaluation of Perennial Grasses and Herbs in Southern Australia. 2. Persistence, Root Characteristics and Summer Activity ». *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, n° 4 (7 mars 2008): 424-35. <https://doi.org/10.1071/EA07136>.
- Oelkers, Eric H., et David R. Cole. « Carbon Dioxide Sequestration A Solution to a Global Problem ». *Elements* 4, n° 5 (1 octobre 2008): 305-10. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.305>.
- Ochoa-Hueso, Raúl, Elizabeth T. Borer, Eric W. Seabloom, Sarah E. Hobbie, Anita C. Risch, Scott L. Collins, Juan Alberti, et al. « Microbial Processing of Plant Remains Is Co-Limited by Multiple Nutrients in Global Grasslands ». *Global Change Biology* 26, n° 8 (2020): 4572-82. <https://doi.org/10.1111/gcb.15146>.
- Payne, Richard J, Nancy B Dise, Christopher D Field, Anthony J Dore, Simon JM Caporn, et Carly J Stevens. « Nitrogen Deposition and Plant Biodiversity: Past, Present, and Future ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 15, n° 8 (2017): 431-36. <https://doi.org/10.1002/fee.1528>.
- Peng, Yunfeng, Dali Guo, et Yuanhe Yang. « Global Patterns of Root Dynamics under Nitrogen Enrichment ». *Global Ecology and Biogeography* 26, n° 1 (2017): 102-14. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>.
- Pérez-Harguindeguy, N., S. Díaz, E. Garnier, S. Lavorel, H. Poorter, P. Jaureguiberry, M. S. Bret-Harte, et al. « New Handbook for Standardised Measurement of Plant Functional Traits Worldwide ». *Australian Journal of Botany* 61, n° 3 (2013): 167. <https://doi.org/10.1071/BT12225>.
- Picon-Cochard, Catherine, Rémi Pilon, Sandrine Revallot, Michel Jestin, et Lorna Dawson. « Use of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy to Predict the Percentage of Dead versus Living Grass Roots ». *Plant and Soil* 317, n° 1 (1 avril 2009): 309-20. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9810-2>.
- Picon-Cochard, Catherine, Rémi Pilon, Emilie Tarroux, Loïc Pagès, Jean Robertson, et Lorna Dawson. « Effect of Species, Root Branching Order and Season on the Root Traits of 13 Perennial Grass Species ». *Plant and Soil* 353, n° 1 (1 avril 2012): 47-57. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1007-4>.

Pilon, Rémi. « Dynamique du système racinaire de l'écosystème prairial et contribution au bilan de carbone du sol sous changement climatique », s. d.

Pontes, L. Da S., J.-F. Soussana, F. Louault, D. Andueza, et P. Carrère. « Leaf Traits Affect the Above-Ground Productivity and Quality of Pasture Grasses ». *Functional Ecology* 21, n° 5 (2007): 844-53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01316.x>.

Poeplau, Christopher, Dorit Zopf, Bärbel Greiner, Rob Geerts, Hein Korvaar, Ulrich Thumm, Axel Don, Arne Heidkamp, et Heinz Flessa. « Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands? » *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265 (1 octobre 2018): 144-55. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.003>.

Poorter, Hendrik, Karl J. Niklas, Peter B. Reich, Jacek Oleksyn, Pieter Poot, et Liesje Mommer. « Biomass Allocation to Leaves, Stems and Roots: Meta-Analyses of Interspecific Variation and Environmental Control ». *New Phytologist* 193, n° 1 (2012): 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>.

« Pratiques culturales en grandes cultures et prairies en 2017 |Agreste, la statistique agricole ». Consulté le 7 septembre 2023. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/S-PK%20GC%202017/methodon/>.

Roumet, Catherine, Marine Birouste, Catherine Picon-Cochard, Murielle Ghestem, Normaniza Osman, Sylvain Vrignon-Brenas, Kun-fang Cao, et Alexia Stokes. « Root Structure–Function Relationships in 74 Species: Evidence of a Root Economics Spectrum Related to Carbon Economy ». *New Phytologist* 210, n° 3 (2016): 815-26. <https://doi.org/10.1111/nph.13828>.

Rutledge, S., A. M. Wall, P. L. Mudge, B. Troughton, D. I. Campbell, J. Pronger, C. Joshi, et L. A. Schipper. « The carbon balance of temperate grasslands part I: The impact of increased species diversity ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239 (15 février 2017): 310-23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.039>.

Ryser, P. « The Importance of Tissue Density for Growth and Life Span of Leaves and Roots: A Comparison of Five Ecologically Contrasting Grasses ». *Functional Ecology* 10, n° 6 (1996): 717-23. <https://doi.org/10.2307/2390506>.

Shao, Xinliang, Lijun Wang, Qin Zhang, Yuhui Liu, et Xitian Yang. « Future Direction of Searching for Root Economics Spectrum: Focusing on the Fibrous Roots “Absorptive Unit” ». *Ecosphere* 10, n° 5 (2019): e02716. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2716>.

Sillen, W. M. A., et W. I. J. Dieleman. « Effects of Elevated CO₂ and N Fertilization on Plant and Soil Carbon Pools of Managed Grasslands: A Meta-Analysis ». *Biogeosciences* 9, n° 6 (22 juin 2012): 2247-58. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2247-2012>.

Silver, Whendee L., et Ryan K. Miya. « Global Patterns in Root Decomposition: Comparisons of Climate and Litter Quality Effects ». *Oecologia* 129, n° 3 (1 novembre 2001): 407-19. <https://doi.org/10.1007/s004420100740>.

Skinner, R. Howard, et Louise H. Comas. « Root Distribution of Temperate Forage Species Subjected to Water and Nitrogen Stress ». *Crop Science* 50, n° 5 (2010): 2178-85. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.08.0461>.

Smit, A. L., A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, et S. C. van de Geijn. *Root Methods: A Handbook*. Springer Science & Business Media, 2013.

Smith, V. H., G. D. Tilman, et J. C. Nekola. « Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems ». *Environmental Pollution* 100, n° 1 (1 janvier 1999): 179-96. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3).

Soussana, Jean-François, et Gilles Lemaire. « Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Integrated Crop-Livestock System Impacts on Environmental Processes, 190 (1 juin 2014): 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>.

Soussana, J. F., T. Tallec, et V. Blanfort. « Mitigating the Greenhouse Gas Balance of Ruminant Production Systems through Carbon Sequestration in Grasslands ». *Animal* 4, n° 3 (1 janvier 2010): 334-50. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990784>.

Steen, E. « Variation of Root Growth in a Grass Ley Studied with a Mesh Bag Technique [Agrostis Capillaris, Phleum Bertolonii, Holcus Lanatus] ». *Swedish Journal of Agricultural Research (Sweden)*, 1984. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Variation+of+root+growth+in+a+grass+ley+studied+with+a+mesh+bag+technique+%5BAgrostis+capillaris%2C+Phleum+bertonii%2C+Holcus+lanatus%5D&author=Steen%2C+E.+%28Sveriges+Lantbruks+univ.%2C+Uppsala.+Inst.+foer+Ekologi+och+Miljoevaard%29&publication_year=1984.

Steingrobe, Bernd, Harald Schmid, et Norbert Claassen. « The Use of the Ingrowth Core Method for Measuring Root Production of Arable Crops – Influence of Soil and Root Disturbance during Installation of the Bags on Root Ingrowth into the Cores ». *European Journal of Agronomy* 15, n° 2 (1 octobre 2001): 143-51. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00100-9).

Stevens, Carly J., Nancy B. Dise, J. Owen Mountford, et David J. Gowing. « Impact of Nitrogen Deposition on the Species Richness of Grasslands ». *Science* 303, n° 5665 (19 mars 2004): 1876-79. <https://doi.org/10.1126/science.1094678>.

Taylor, Edith L., Thomas N. Taylor, et Michael Krings. *Paleobotany: The Biology and Evolution of Fossil Plants*. Academic Press, 2009.

Theau, Jean-Pierre, et Jean Philippe J. P. Choisis. « Prairie permanente : Définition », 2016. <https://doi.org/10.17180/46G7-HZ56>.

« Un pacte vert pour l'Europe », 14 juillet 2021. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr.

Violle, Cyrille, Marie-Laure Navas, Denis Vile, Elena Kazakou, Claire Fortunel, Irène Hummel, et Eric Garnier. « Let the Concept of Trait Be Functional! » *Oikos* 116, n° 5 (2007): 882-92. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>.

Wright, Ian J., Peter B. Reich, Mark Westoby, David D. Ackerly, Zdravko Baruch, Frans Bongers, Jeannine Cavender-Bares, et al. « The Worldwide Leaf Economics Spectrum ». *Nature* 428, n° 6985 (avril 2004): 821-27. <https://doi.org/10.1038/nature02403>.

Xu, Xinxiang, Xin Du, Fen Wang, Jianchuan Sha, Qian Chen, Ge Tian, Zhanling Zhu, Shunfeng Ge, et Yuanmao Jiang. « Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings ». *Frontiers in Plant Science* 11 (2020). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00904>.

Zhang, Tian'an, Han Y. H. Chen, et Honghua Ruan. « Global Negative Effects of Nitrogen Deposition on Soil Microbes ». *The ISME Journal* 12, n° 7 (juillet 2018): 1817-25. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0096-y>.

Zhang, Yunhai, Jinchao Feng, Forest Isbell, Xiaotao Lü, et Xingguo Han. « Productivity Depends More on the Rate than the Frequency of N Addition in a Temperate Grassland ». *Scientific Reports* 5, n° 1 (28 juillet 2015): 12558. <https://doi.org/10.1038/srep12558>.

Zhao, Yuanyuan, Zhifeng Liu, et Jianguo Wu. « Grassland Ecosystem Services: A Systematic Review of Research Advances and Future Directions ». *Landscape Ecology* 35, n° 4 (1 avril 2020): 793-814. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00980-3>.

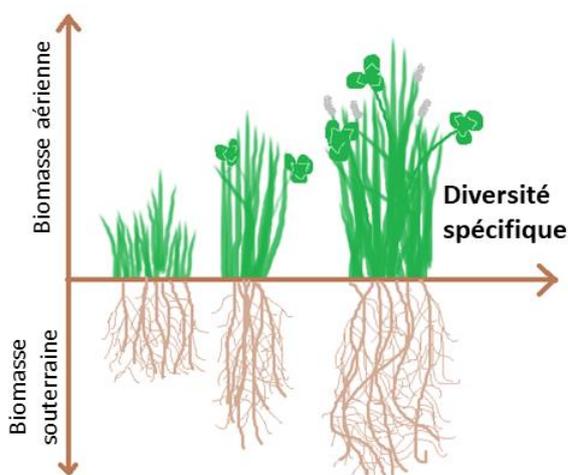
Projet : MixRoot-C (2021-2024)

Rodriguez L, Darsonville O, Louault F, Picon-Cochard C, Klumpp K

Mesurer l'effet des systèmes racinaires d'une prairie multi-spécifique sur le **flux de carbone et la séquestration** de la matière organique dans les sols agricoles Européens.

Question :

- Les agroécosystèmes diversifiés ont-ils un potentiel plus élevé de séquestration de carbone dans le sol ?
- Quelle est la contribution relative des racines ?
- Comment les pratiques de gestion influent-elles sur la contribution relative des racines au SOC ?



Contexte

Lancée lors de la COP21 en 2015, l'initiative du Quatre pour mille propose d'augmenter le stockage de carbone dans le sol de 4‰, soit 0,4% afin de compenser les émissions anthropiques de CO₂ et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Cela reviendrait à stocker 1,85 Gigatonne de plus chaque année.

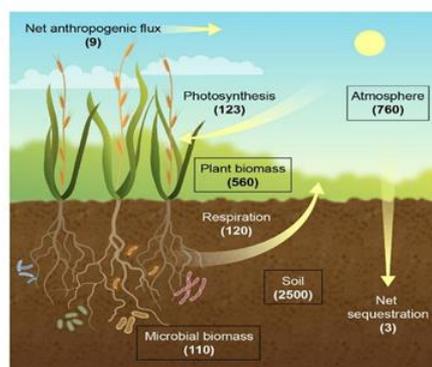


Schéma des flux de carbone dans le sol en Gt (Janson et al, 2021)

Concept

Une diversité élevée induit une **production de biomasse plus élevée** par complémentarité et compétition, ce qui induit une plus grande **quantité de racines mortes** et de matière organique (MO). Selon la quantité et qualité de MO qui rentre dans le sol, **la dégradation et l'immobilisation** (stockage du C) dans le sol varie.

Mode opératoire

La méthode utilisée est celle des **Ingrowth cores**, qui consiste d'un filet rempli de terre dénuée de racines, dont le volume est connu. Les racines vont ensuite pousser à travers le filet qui sera récolté après quatre mois, permettant de calculer la production racinaire sur une surface donnée, pour un temps donné.

La terre est également analysée pour quantifier le carbone **des racines décomposés et exsudats** qui entrent dans le sol sous forme particulaire.

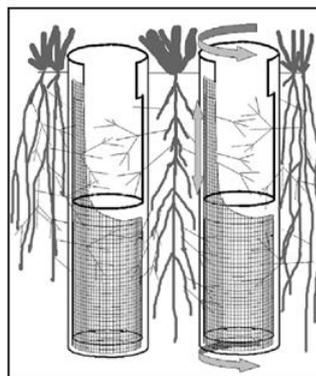


Schéma d'un ingrowth core (Leake et al, 2004)



INRAE

Visite Theix 08 Jun 2023



Annexe 1 : Poster produit à l'occasion de la présentation du projet MixRoot du séminaire national pour les animateurs des groupes d'agriculteurs en polyculture-élevage et grandes cultures du réseau DEPHY ferme du projet EcoPhyto