



HAL
open science

Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse à la fertilisation

Flavie Gerle

► **To cite this version:**

Flavie Gerle. Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse à la fertilisation. Sciences de l'environnement. 2020. hal-04069037

HAL Id: hal-04069037

<https://hal.inrae.fr/hal-04069037v1>

Submitted on 14 Apr 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.

INRAE

INRAE
UMR10874
ECOSYSTEME PRAIRIAL (UREP)



Rapport de stage de 2^{ème} année

Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse à la fertilisation



Flavie GERLE
IUT de Saint-Etienne
Génie Biologique Génie de
l'Environnement
2^{ème} année (2019-2020)
Période de stage :
1 juin au 31 juillet 2020
Tuteur :
M. Laurent VILLERMET

Entreprise :

Institut National de Recherche pour l'Agriculture,
l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)

Unité :

Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP)
INRAE, site de Crouël, 5 Chemin de Beaulieu
63000 Clermont-Ferrand

Responsables de stage :

Mme Catherine PICON-COCHARD
Mme Frédérique LOUAULT
Mme Nathalie VASSAL

Remerciements :

Je remercie tout d'abord Mme. Catherine Picon-Cochard, directrice de l'UREP, qui m'a permis de réaliser mon stage malgré la situation sanitaire.

Je remercie également Catherine Picon-Cochard, Frédérique Louault et Nathalie Vassal pour m'avoir encadrée tout au long de mon stage et pour l'aide qu'elles ont pu m'apporter.

Je remercie aussi Anne-Marie qui a passé beaucoup de temps à m'aider pour les manipulations.

Je remercie l'ensemble des personnes de l'unité ainsi que les stagiaires pour la très bonne ambiance au sein de l'UREP.

Je remercie enfin mon tuteur universitaire M. Villermet ainsi que le reste de l'équipe de mon IUT qui ont passé du temps sur l'organisation des stages malgré la situation et avec qui ces deux années ont été très agréables.

Résumé :

Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse à la fertilisation

Résumé – Les prairies permanentes constituent des agroécosystèmes rendant de nombreux services écosystémiques tels que la production fourragère, le support d'une biodiversité très importante ou encore le stockage du carbone. La quantité de carbone pouvant entrer dans les sols des prairies permanentes est en partie liée à la production de biomasse racinaire. En revanche, la manière dont le système racinaire permet les entrées de carbone reste encore assez peu étudiée. Cette étude a donc pour objectif de caractériser la dynamique de la croissance racinaire en réponse à la fertilisation. Pour cela, a donc été mise en place la méthode des « Ingrowth-Core » de 2015 à 2016 sur des parcelles non fertilisées (fauche nulle) et fertilisées avec apport d'engrais NPK (fauche npk) situées en prairies permanentes de moyenne montagne. On a observé que la production racinaire était plus importante en traitement fauche nulle qu'en traitement fauche npk. Le comportement inverse était observé pour la production de biomasse aérienne. Le ratio racinaire/aérien a montré que la biomasse était allouée principalement vers les racines en traitement fauche nulle. L'étude des traits morphologiques aériens et racinaires a montré deux stratégies d'acquisition des ressources différentes selon le type de traitement. En traitement fauche nulle, on voit une stratégie conservatrice, avec augmentation de la longueur des racines par exemple, et en traitement fauche fertilisé on voit plutôt une stratégie d'exploitation des ressources avec des hauteurs en aérien plus importantes. La gestion des prairies permanentes avec utilisation de fertilisants a donc un impact sur la production racinaire et aurait alors potentiellement un impact sur le cycle du carbone et son stockage dans les sols de ce type de prairie.

Mots clés : Prairies permanentes, production racinaire et aérienne, traits morphologiques, stratégies d'acquisition, fauche, fertilisation.

Abstract :

Dynamics of root growth in permanent grasslands in response to fertilization

Abstract – Permanent grasslands constitute agroecosystems that provide many ecosystem services such as forage production, support for a very large biodiversity, or also carbon storage. The amount of carbon that can enter permanent grasslands soils is partly related to root biomass production. However, the way in which root system permits carbon inputs is still poorly studied. This study have objective to characterise the root growing dynamic in response to fertilization treatment. To do it, we set up the « Ingrowth-Core » method from 2015 to 2016 on plots without fertilization treatment (fauche nulle) and with NPK fertilization inputs (fauche npk) situated in permanent grasslands of middle mountain. We have observed that root production was more important in the no-fertilization treatment. Reversed behaviour was seen for the aerial production. Root : shoot ratio showed that biomass was principally allocated to roots in the no-fertilization treatment. The study of the morphologic traits showed two different acquisition strategies of resources according to the treatment applied. In the no-fertilization treatment, we see a conservative strategy with for example the higher root length. In the npk treatment, we see an exploitation strategy of resources with higher aerial heights. The utilisation of fertilizers on permanent grasslands have an impact on root production and would potentially have an impact on the storage of carbon on soils.

Keys words : Permanent grasslands, root and aerial production, morphologic traits, acquisition strategies, mowing, fertilization

Liste des abréviations :

- C1 et C2 : classes de diamètres des racines (< ou > à 0.2 mm)
- diam : diamètre
- dpi : dot per inch (point par pouce)
- EFPA : Ecologie des Forêts, des Prairies et des milieux Aquatiques
- ETPP : évapotranspiration potentielle de Penman
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIEC : Groupement Intergouvernemental d'Etude de Climat
- H : hauteur reproductive
- IGC : Ingrowth-Core
- INRA : Institut National pour la Recherche Agronomique
- INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
- IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture
- LDMC : Leaf Dry Matter Content (teneur en matière sèche des limbes)
- NPK (ou npk) : symboles des éléments chimiques azote, phosphore et potassium
- RDMC : Root Dry Matter Content (teneur en matière sèche des racines)
- RR (ou P) : précipitations
- RTD : Root Tissue Density (densité des tissus racinaires)
- SAU : Surface Agricole Utile
- SLA : Specific Leaf Area (rapport de la surface sur la masse sèche d'une feuille)
- SOERE-ACBB : Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement – Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité
- SRA : Surface Spécifique Racinaire
- SRL : Specific Root Length (surface spécifique des racines)
- UMR : Unité Mixte de Recherche
- UREP : Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial

Table des matières

Introduction :	1
I. Organisme d'accueil :	2
1. <i>Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement :</i>	2
2. <i>Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial :</i>	2
II. Etat de l'art :	3
1. <i>Prairie permanente :</i>	3
2. <i>Cycle du carbone en prairie permanente :</i>	3
3. <i>Mode de gestion des prairies permanentes :</i>	4
4. <i>Système racinaire en prairie permanente :</i>	4
5. <i>Traits morphologiques des racines :</i>	5
6. <i>Hypothèse :</i>	5
III. Matériel et méthodes :	6
1. <i>Dispositif expérimental :</i>	6
2. <i>Traitement des parcelles :</i>	7
3. <i>Méthodes des Ingrowth-core :</i>	7
4. <i>Traitement des échantillons :</i>	8
a. <i>Lavage des carottes :</i>	8
b. <i>Pesée :</i>	8
5. <i>Analyse morphologique :</i>	9
a. <i>Scan des racines :</i>	9
b. <i>Analyse des images :</i>	9
6. <i>Biomasse et composition botanique des parties aériennes :</i>	10
7. <i>Météorologie du site de Theix :</i>	10
8. <i>Analyses statistiques :</i>	10
IV. Résultats :	11
1. <i>Conditions climatiques :</i>	11
2. <i>Dynamique de la croissance racinaire :</i>	15
3. <i>Effet des traitements nul et npk sur les productions racinaires et aériennes :</i>	16
4. <i>Traits racinaires et aériens :</i>	18
V. Discussion :	19
1. <i>Impact des conditions climatiques sur la production racinaire :</i>	19
2. <i>Impact des traitements :</i>	19
3. <i>Effet des traitements sur les traits morphologiques :</i>	20
4. <i>Regard critique :</i>	21
Conclusion :	21
Références :	1
Table des figures et des tableaux:	1

Introduction :

Les prairies permanentes sont des terrains enherbés, principalement caractérisés par des végétaux tels que des plantes fourragères herbacées, au sol peu ou pas travaillé depuis au moins 5 ans. Elles servent essentiellement au pâturage animal et à la récolte fourragère. Ces terrains représentent 30% de la surface agricole utile (SAU) française et se trouvent surtout en zones de montagnes. Ces espaces sont également le support d'agroécosystèmes très importants et très diversifiés.

Les prairies permanentes rendent de nombreux services écosystémiques en permettant la régulation des cycles du carbone et de l'azote. Elles permettent également de limiter l'érosion des sols et favorisent l'alimentation en eau du sol et des nappes phréatiques. Ces lieux sont le support d'une biodiversité très importante, qu'elle soit végétale, animale ou microbienne. Le principal atout des prairies permanentes est sa capacité à stocker de très importantes quantités de carbone. On parle de puits de carbone. En effet, rien que l'activité agricole en France représente un peu moins d'un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES), quantité que le stockage en prairie permanente contribue à compenser.

Les entrées de carbone en prairies permanentes se font grâce au couvert végétal présent en surface mais aussi en souterrain. La biomasse racinaire joue ainsi un rôle particulier dans la limitation des GES et permet d'augmenter ou de diminuer les entrées de carbone et azote dans le sol.

La biomasse végétale est influencée par la gestion pratiquée en surface du sol. Les pratiques de gestions des prairies permanentes recouvrent deux dimensions principales: un mode d'utilisation en pâturage ou en fauche, et la fertilisation. Ainsi, on sait déjà que la diversité des espèces diminue malgré une augmentation de la production aérienne lorsque la fertilisation azotée augmente. Ici nous nous intéresserons à l'impact de la fertilisation sur la production de biomasse racinaire, actuellement moins étudiée que la biomasse aérienne.

La partie racinaire des végétaux permet de connaître l'état des sols grâce à l'étude de leurs traits morphologiques. Ces traits sont de deux types : les traits de réponse, où l'on mesure une différence en réponse à un changement de l'environnement, et les traits d'effet, où l'on mesure une différence liée à un changement de propriété ou de fonctionnement de la plante. Ces traits, aussi appelés fonctionnels, nous permettent de distinguer deux stratégies appliquées par les végétaux : une stratégie conservative, caractéristique des milieux pauvres en minéraux et une stratégie exploitative, existant plutôt en milieu riche.

Nous nous appliquerons, dans la suite de ce rapport, à étudier l'effet de la fertilisation par apport de NPK ou sans apport sur la croissance de la biomasse racinaire en prairie permanente lors d'une étude menée de 2015 à 2016. Nous regarderons également la réponse des traits racinaires face au mode de gestion. Pour cela, la croissance de la biomasse racinaire sera quantifiée par la méthode des Ingrowth-core et les traits racinaires seront caractérisés face à la disponibilité en nutriments dans le sol. Ces résultats seront mis en relation avec la production et les traits aériens, ainsi qu'avec la composition botanique.

Dans un premier temps, seront présentés l'organisme d'accueil et le contexte de l'étude. Viendra ensuite une présentation de la méthode de réalisation, puis une partie présentant les résultats obtenus lors de l'étude. Enfin ces résultats seront discutés.

I. Organisme d'accueil :

1. Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement :

L'INRA, Institut National pour la Recherche Agronomique, est un établissement public à caractère scientifique et technologique créé en 1946 à la fin de la Seconde Guerre Mondiale pour parer à la pénurie alimentaire qui menace la France. L'institut doit associer la science et la technologie pour améliorer les techniques d'élevage, d'agriculture et plus récemment de paramètres tels que la qualité des aliments ou la gestion de l'environnement dans les pratiques humaines.

A partir du 1^{er} janvier 2020, l'INRA fusionne avec l'IRSTEA, organisme public de recherche en environnement et agriculture. Il devient ainsi l'INRAE, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement.

Cet établissement est sous tutelle de deux ministères : celui de la Recherche et celui de l'Agriculture et de l'Alimentation.

L'INRAE se compose de 18 centres de recherche régionaux, et 14 départements de recherche axés sur différentes thématiques environnementales. Plus de 8000 titulaires et 3000 agents contractuels sont répartis dans les 268 unités de recherche, de services et expérimentales. Le rayonnement de l'INRAE est international et c'est l'un des premiers établissements publiant le plus de documents scientifiques dans le monde.

En Auvergne-Rhône-Alpes, l'INRAE est organisé en deux centres comprenant environ 1400 agents : le centre Clermont et le centre Lyon-Grenoble.

Le centre de Clermont, avec ses 840 agents, est un site de recherche au plus près des préoccupations et des dynamiques des territoires dans des secteurs clés de l'agriculture, de l'environnement et de l'alimentation.

2. Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial :

L'UREP, Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, se situe sur le site clermontois de Crouël. Les différents dispositifs expérimentaux de terrain se trouvent en revanche sur les sites de Theix et de Laqueuille.

Cette unité est, depuis 2016, regroupée avec VetAgroSup et forme l'Unité Mixte de Recherche Ecosystème Prairial. Elle est également rattachée au département EFPA, Ecologie des Forêts, des Prairies et des milieux Aquatiques. L'UMR est composée de 25 agents permanents et de 8 agents non titulaires.

Le grand axe de recherche de l'unité porte sur « l'agroécologie des prairies dans un contexte de changement global », tant dans un contexte de changement climatique que dans un contexte de changement des pratiques d'utilisation des terres. Les recherches sont faites autour de trois thèmes principaux, à savoir, thème 1 : « Assemblage et dynamique des communautés », thème 2 : « Régulation biologique des cycles » et thème 3 « Réponses des agroécosystèmes aux changements globaux ».

II. Etat de l'art :

1. Prairie permanente :

Une prairie permanente est une « surface dans laquelle l'herbe ou d'autres plantes fourragères herbacées prédominent depuis cinq années révolues ou plus ». Ce type de prairie regroupe les landes, les parcours et estives (PAC 2015).

Les prairies permanentes représentent 30% de la surface agricole française (SAU). Elles servent principalement au pâturage ou à la production fourragère. Ces prairies sont majoritairement composées d'espèces herbacées telles que les poacées (graminées), les fabacées (légumineuses) et autres dicotylédones non fixatrices d'azote (Louault et al. 2005).

Ces espaces représentent des agroécosystèmes offrant de nombreux services écosystémiques de régulation, d'approvisionnement et culturels. Les services de régulation désignent ainsi leur capacité à fixer et stocker le carbone, à limiter l'érosion, à entretenir une biodiversité conséquente ou encore à réguler la qualité de l'eau. Les services d'approvisionnement représentent les capacités fourragères de ces prairies et les services culturels indiquent leur intérêt paysager et patrimonial (« Quelle évaluation économique pour les services écosystémiques rendus par les prairies en France métropolitaine ? »).

2. Cycle du carbone en prairie permanente :

Le GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Etude de Climat) a montré que depuis 1970, les émissions annuelles de gaz à effet de serre augmentent, passant ainsi de 28.7 à 49.0 Gigatonnes équivalent CO₂ en 2004. 14% de ces émissions seraient dues à l'agriculture.

Les prairies permanentes s'avèrent être des espaces de stockage importants pour le carbone. Cette capacité de stockage dépend en revanche de différents facteurs comme la croissance des végétaux, l'activité microbienne, le climat du site considéré et le type de gestion appliqué sur la prairie (Soussana, Tallec, et Blanfort 2010).

Le carbone entrant dans le sol correspond au résultat de la photosynthèse des parties végétales aériennes. Il peut également provenir de la litière formée par les limbes et collets sénescents des parties aériennes. D'après Williamson, 1976 ; Heal & Perkins, 1976 ; Meurk, 1978, la litière aérienne produite représenterait 1 à 4 tC ha⁻¹ an⁻¹. Une partie du carbone peut aussi venir de la partie souterraine des végétaux. Selon Gastal & Saugier, 1986 ; Garay et al., 2000, la litière racinaire représente 2 à 7 tC ha⁻¹ an⁻¹ (Sources citées par Pilon, 2011). La gestion par fauche des prairies permanentes peut limiter les quantités de litière fournies par les parties aériennes, rendant alors les parties souterraines vecteurs très importants des entrées de carbone dans le sol.

L'apport de carbone dans le sol par les racines se fait principalement par rhizodéposition (sécrétion de composés riches en carbone directement dans le sol par les racines), surtout en stratégie conservative (Henneron et al. 2019) et par décomposition des racines mortes.

3. Mode de gestion des prairies permanentes :

La gestion des prairies permanentes est indispensable à leur conservation. En effet, non-entretenu pour rester au stade herbacé, les prairies passeraient à un stade boisé sous un climat tempéré.

Les modes de gestion des systèmes prairiaux sont la fertilisation, la fauche et le pâturage. Ces différents traitements influencent la biodiversité des espèces présentes sur les prairies permanentes mais aussi la croissance racinaire et aérienne.

L'une des gestions employées pour l'entretien des prairies permanentes est la fauche. Ce mode de gestion permet également de récupérer la biomasse aérienne pour être utilisée comme fourrage. La gestion des prairies influe aussi sur la production racinaire. Cela aura alors pour effet secondaire de jouer sur la capacité de la prairie à stocker plus ou moins de carbone dans son sol (Derner et Schuman, 2007, cités par Herfurth, 2015).

La gestion des prairies a pour effet de provoquer une allocation de biomasse entre les parties aériennes et racinaires. Ainsi, la croissance aérienne et racinaire dépendra du facteur limitant. Si celui-ci est aérien (lumière, CO₂), l'allocation de biomasse ira vers les parties aériennes et si le facteur limitant est souterrain (éléments minéraux, eau), l'allocation de biomasse se fera vers les racines. De plus, a été montré par Picon-Cochard, Pilon, et Revaillo, 2009, qu'il existait des variations de production de biomasse aérienne ou racinaire en utilisation de fertilisants. Si l'apport d'azote dans le sol est faible, la production racinaire sera plus importante que la production aérienne.

4. Système racinaire en prairie permanente :

Les racines des végétaux permettent leur ancrage dans le sol, mais aussi des fonctions comme l'absorption des éléments minéraux et de l'eau, le stockage (d'éléments comme le carbone par exemple). Les racines effectuent la synthèse de certaines hormones. Certaines espèces de plantes comme les fabacées peuvent faire des symbioses avec des bactéries pour aider à l'absorption de certains nutriments (azote atmosphérique).

Les végétaux rencontrés dans les prairies permanentes possèdent deux types de systèmes racinaires différents. Les monocotylédones comme les graminées possèdent un système racinaire fasciculé (nombreuses racines partant de la base de la tige) alors que les dicotylédones comme les fabacées ou autres plantes non fixatrices d'azote ont un système racinaire pivotant (avec une racine verticale principale). La majorité des racines poussent jusqu'à 20 cm de profondeur environ.

Les végétaux peuvent également former sous terre des rhizomes. Ce sont des tiges souterraines permettant de stocker des réserves (carbone et nutriments) et de former de nouveaux individus au niveau de leurs nœuds par propagation horizontale. Les rhizomes sont principalement formés par les graminées (comme *Elytrigia repens*).

On remarque aussi que les végétaux possèdent différents types de racines : les racines primaires et les racines secondaires (ou plus). Les racines primaires sont des racines poussant depuis la base de la tige. Ces dernières poussent généralement plus rapidement que

les racines secondaires ou tertiaires (Fitter et al., 1991 ; Pagès et al., 1993, cités par Pilon, 2011). La croissance des racines se fait par l'apex méristématique au bout de la racine.

5. Traits morphologiques des racines :

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)

Deux types de traits sont observés chez les végétaux : les traits de réponse et les traits d'effet. Les traits de réponse sont ceux modifiés par à un changement d'un facteur environnemental et les traits d'effet sont ceux qui sont dus aux groupes de plantes pouvant affecter leur environnement, comme c'est le cas des plantes fixant l'azote atmosphérique. Les traits fonctionnels représentent certaines caractéristiques chez les plantes. Ils peuvent ainsi renseigner sur les stratégies utilisées par les plantes. Il existe de nombreux types de stratégies utilisées par les plantes, dont deux étudiées ici. La stratégie de type exploitative en aérien est plutôt représentative des milieux riches en minéraux. Cette stratégie est caractérisée par des plantes poussant plus rapidement et étant plus grandes. Au contraire, une plante étant plus petite sera caractéristique d'une stratégie conservatrice en aérien, que l'on peut trouver en milieux pauvres en éléments nutritifs. Cette dernière stratégie sera également caractérisée par de faibles longueurs racinaires, qui pourront en revanche vivre plus longtemps, ainsi que par des diamètres de racines assez importants (par rapport à la stratégie exploitative) (Bissohong, 2018).

De plus, les végétaux possèdent une certaine plasticité, ce qui leur permet de s'adapter à leur environnement en fonction des variations qui peuvent leurs être appliquées, qu'elles soient naturelles ou anthropiques.

6. Hypothèse :

Ici seront étudiés la croissance racinaire et les traits morphologiques racinaires sur des parcelles fauche nulle (sans apport de fertilisants) et fauche npk (avec apport de fertilisants azote, phosphore et potassium). Les échantillons utilisés ont été prélevés en 2015 et 2016 par la méthode des Ingrowth-core.

On suppose que la croissance racinaire sera plus importante sur les parcelles non fertilisées car les plantes devraient être associées à une stratégie conservatrice dans un milieu contenant moins d'éléments nutritifs. On devrait également retrouver les traits morphologiques associés, comme par exemple une hauteur ou une SLA (surface spécifique foliaire) plus faibles. En racinaire, on devrait avoir des diamètres plus importants ou encore des longueurs de racines plus petites.

Cela permettrait de mettre en évidence le phénomène d'allocation de la biomasse selon le type de gestion en fertilisation.

III. Matériel et méthodes :

1. Dispositif expérimental :

L'étude est menée sur le dispositif expérimental du Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement – Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité (SOERE – ACBB). Ce dispositif se trouve sur la commune de Saint-Genès-Champanelle au Puy de Berzet (coordonnées : 45°43'43''N, 03°01'21''E) 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 dispositif est divisé en deux blocs, le premier : le bloc Blatière et le second : le bloc Moine. Ces derniers ont des caractéristiques géologiques et pédologiques différentes. Le bloc 1 est principalement granitique alors que le bloc 2 est constitué de colluvions. On sait également que le bloc 1 est généralement plus productif que le bloc 2. Ces différences seront donc à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

Dans chaque bloc, les différents traitements testés et mis en place depuis 2005 sont répétés deux fois. Parmi ces traitements, sont étudiés : l'évolution de l'écosystème prairial en fonction du niveau d'utilisation de l'herbe en pâturage et en fonction de la restitution des éléments nutritifs N, P et K en fauche.

Des suivis de base sont effectués sur les parcelles. On étudie plusieurs paramètres sur la biomasse aérienne (rendement, qualité, ...), mais également les données météorologiques du site, la température, l'humidité du sol et la composition botanique des parcelles.

Ici, nous nous intéresserons au facteur « restitution N, P, K » avec un niveau non fertilisé et un niveau fertilisé avec 240 unités de N, 60 de P₂O₅ et 200 de K₂O. Ce traitement représente sur le dispositif expérimental une surface de 3200 m² sur les deux blocs (à raison de 400 m² par parcelles, elles même au nombre de 8).

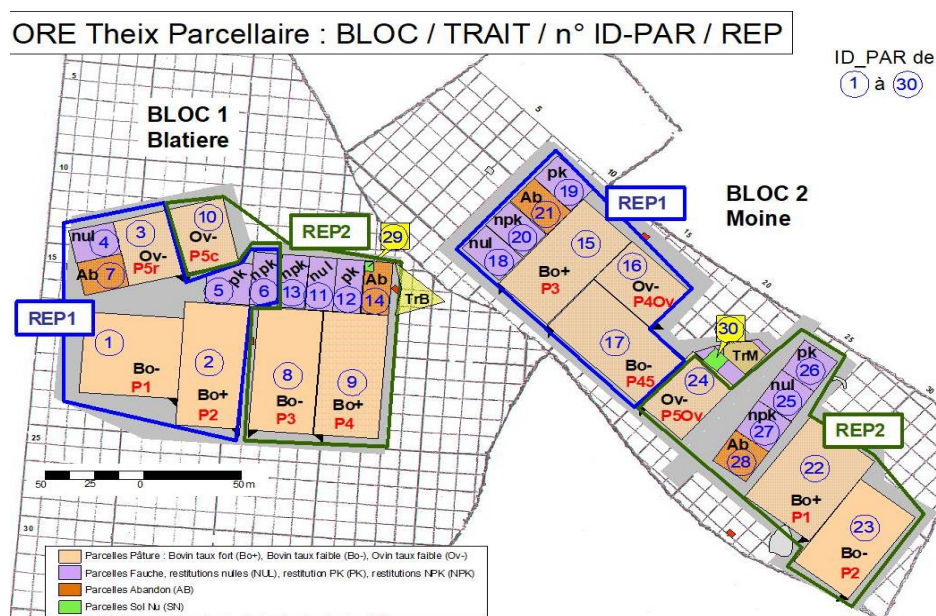


Figure 1 : Présentation du dispositif SOERE - ACBB de l'INRAE de Theix (Saint Genès Champanelle)

2. Traitement des parcelles :

Les parcelles sont traitées en utilisant un gradient de fertilisation nulle ou apport NPK.

Les parcelles subissant une fertilisation minérale (notées « npk ») reçoivent donc un traitement avec apport de NPK.

L'apport d'azote se fait sous forme d'ammonitrate et vise un indice de nutrition azotée supérieur ou égal à 0.9. Cet apport se fait trois fois dans l'année : une première fois en fin mars - début avril, une seconde fois après la première fauche et enfin une dernière fois après la deuxième fauche.

Les apports de phosphore et potassium se font respectivement sous forme de Super Phosphate et de chlorure de potassium et doivent aussi avoir des indices de nutrition supérieurs ou égaux à 0.9. Les apports se font deux fois par an : une fois en fin mars - début avril et une autre fois après la première fauche.

Les parcelles non fertilisées (notées « nul ») sont seulement fauchées.

La fauche se fait trois fois par an, une première coupe vers le 25 mai, une seconde entre le 20 et le 30 juillet et une dernière fois entre le 15 et le 20 octobre. On utilise une machine AMAZONE équipée d'un fléau et d'une benne récupératrice de l'herbe coupée. L'herbe est coupée de 5.5 à 6.0 cm du sol.

La restitution (ou non) d'éléments minéraux dans le sol va influencer la production de l'écosystème, mais aussi la nature et la qualité de ses composantes telles que les organismes ou les plantes s'y trouvant. La matière organique du sol pourra également être modifiée.

3. Méthodes des Ingrowth-core :

La méthode Ingrowth-core, ou IGC, permet de mesurer la croissance de la biomasse racinaire à intervalles réguliers sur le même volume de sol et toujours au même endroit. Dans le cas de notre étude, la production racinaire est déterminée environ tous les mois. Cette production correspond à la quantité en grammes de matière sèche racinaire récupérée entre chaque prélèvement des IGC ramené à une unité de surface en mètres carrés. La biomasse trouvée permettra également de caractériser les traits morphologiques racinaires.

Pour mettre en place un IGC, on creuse un trou de 20 cm de profondeur et de 8 cm de diamètre. On y place un filet en plastique de mailles 8 mm. Le filet est ensuite rempli de terre sèche préalablement tamisée (sur un tamis de 5 mm) pour enlever les éléments indésirables tels que les racines ou les débris. La terre est légèrement tassée. En raison de la différence de type de sol des deux blocs, la terre utilisée pour remplir les filets provient du même bloc que celui accueillant l'IGC. La terre est préparée et séchée à l'avance pour éviter au maximum la minéralisation de la matière organique et ainsi limiter la quantité d'azote minéral.

Une fois l'IGC prélevé, un autre est mis en place. Ce dernier sera donc récupéré le mois suivant.

Les carottes de sol sont ensuite gardées au congélateur puis décongelées à 4°C juste avant le traitement.

Mise en place et prélèvement

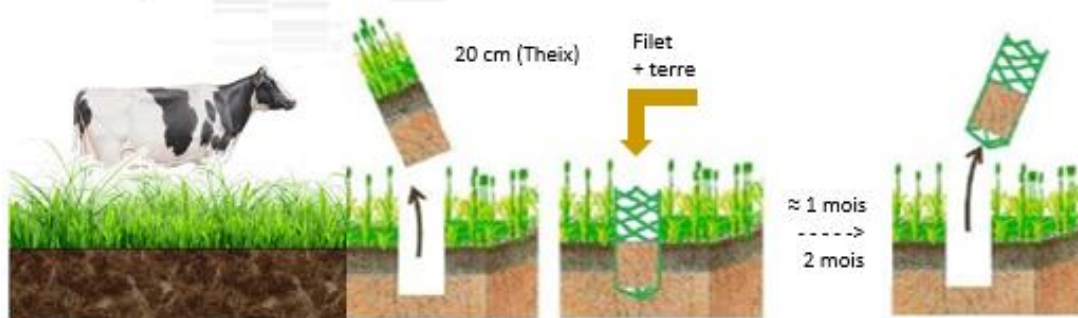


Figure 2 : Schéma de la mise en place et du prélèvement des Ingrowth-core (Source : Anpp-Bnpp-THE-LAQ_08Mar2017_Red_FG, LOUAULT)

4. Traitement des échantillons :

a. Lavage des carottes :

Lors de cette étape, on cherche à extraire et à nettoyer toutes les racines vivantes se trouvant dans les carottes de sol.

La carotte est trempée et rincée à l'eau dans un seau pour séparer le filet de la terre s'y trouvant. Les racines restantes sur le filet sont ramassées pour éviter les pertes. Les racines se trouvant dans le seau sont filtrées sur deux tamis superposés de 1 et 0.2 mm, puis lavées au jet d'eau. Elles sont ensuite placées dans des barquettes en plastique. Un dernier lavage est fait afin d'écartier les morceaux de terre restants, les racines mortes et éventuelles parties aériennes. Tout cela doit se faire de façon à conserver au maximum l'intégrité de chaque racine. Les rhizomes et stolons sont également gardés.

La partie racinaire obtenue est placée en chambre froide à 4°C dans un papier humide pour éviter qu'elle ne se déshydrate en attente de la pesée en poids frais.

b. Pesée :

Le plus tôt possible après le lavage, les racines sont pesées avec une balance de précision pour obtenir leur poids frais. L'échantillon de racine est ensuite séparé en deux parties dont une nommée « sous-échantillon » sera scannée. L'autre partie est conservée.

Après le scan, le sous-échantillon est placé à l'étuve à 60°C pendant au moins 48h. Une fois sèches, toutes les parties du sous-échantillon sont pesées puis additionnées pour obtenir le poids sec total du sous-échantillon. Cette valeur permettra par la suite de calculer la teneur en matière sèche des racines (ou RDMC).

Les éventuels rhizomes et stolons sont pesés en frais et sec séparément des racines.

Entre la pesée en frais et la pesée en sec, une partie des racines est scannée pour l'analyse morphologique des traits racinaires (voir paragraphe « Analyse morphologique »).

Lavage, pesée, scannage



Figure 3 : Présentation du traitement des échantillons avec dans l'ordre : IGC prélevé, lavage des racines de l'IGC sur tamis, biomasse racinaire formant l'échantillon et pesée en frais et sec de l'échantillon (Source : Anpp-Bnpp-THE-LAQ_08Mar2017_Red_FG, LOUAULT)

5. Analyse morphologique :

a. Scan des racines :

Après la pesée en frais, l'échantillon de racines est séparé en deux parties. L'une de ces parties est considérée comme représentative de la biomasse de l'IGC considéré et représente le sous-échantillon.

Ce dernier est coloré au bleu de méthylène puis placé dans une cuve en verre carrée avec un fond d'eau. Les racines sont démêlées et doivent éviter de se chevaucher. On place un film transparent en plastique par-dessus pour éviter les mouvements d'eau. La cuve est déposée sous le capot lumineux du scanner (Epson Perfection V800 Photo) et la numérisation se fait à une résolution de 800 dpi.

Pour chaque sous-échantillon, on réalise 4 à 5 scans avec les racines les plus représentatives. Une fois les racines scannées, elles sont récupérées et mises dans des petites pochettes en aluminium. Le reste du sous-échantillon est également repris et traité de la même façon. L'ensemble est ensuite déposé à l'étuve (60°C) pendant 48h en attendant d'être pesé en sec.

Le RDMC, teneur en matière sèche des racines sera calculé par : $\frac{\text{masse sèche racinaire}}{\text{masse fraîche racinaire}}$.

b. Analyse des images :

L'analyse des images se fait avec le logiciel WinRhizo (version 2012b, Regent Instruments, Québec, Ca) qui permet de mesurer différents paramètres relatifs aux racines. On obtient donc les valeurs de longueurs racinaires, de volumes racinaires et de diamètres racinaires par classes de diamètre (< ou > à 0.2 mm). Ces dernières nous permettront de déterminer la longueur spécifique des racines (SRL en m.g⁻¹), la densité de tissus racinaires (RTD en g.m⁻³), le diamètre moyen (en mm) et la surface spécifique des racines (SRA en cm³/g).

6. Biomasse et composition botanique des parties aériennes :

Une observation botanique est réalisée autour de chaque IGC à chacune des trois coupes annuelles des parcelles. Pour cela, on place un anneau de 20 cm de diamètre par-dessus les IGC pour délimiter un certain espace aérien ainsi que les plantes s'y trouvant. On suppose que les espèces présentes sont celles dont les racines seront récupérées dans les Ingrowth-core.

Les biomasses aériennes de chaque couronne sont récoltées avant le passage de la faucheuse. Le prélèvement se fait à la tondeuse à 5.5 cm du sol pour éviter les collets des graminées (zone de transition entre tige et racine). Les plantes sont triées, séchées à 60°C pendant 48h et pesées. On obtient ainsi la masse aérienne produite par date de coupe (en g/m²).

Les observations visuelles permettront d'évaluer combien d'espèces différentes sont présentes dans la couronne. Les abondances de chaque espèce seront également déterminées. Les traits agrégés seront ensuite calculés en prenant en compte seulement les espèces dominantes dans la couronne, c'est-à-dire les espèces ayant une abondance représentant au moins 85% de la surface considérée par la couronne. Les traits étudiés seront calculés à partir de valeurs de traits par espèces et par parcelles des années précédentes en faisant la moyenne pondérée par chaque abondance de chaque espèce. On obtiendra ainsi la hauteur reproductive (H en cm), le taux de matière sèche des limbes (LDMC en g/g) et la surface spécifique des limbes (SLA en cm²/g).

Ces suivis permettent de mettre en relation les productions racinaires avec les communautés végétales de chaque IGC.

7. Météorologie du site de Theix :

Dans cette étude nous prendront en compte les conditions climatiques du site du Puy de Berzet.

Les données sont récoltées grâce à une station météo implantée directement à côté des parcelles. Elles sont ensuite compilées sur le site Climatik (Agroclim, INRAE Avignon).

On utilisera les données de précipitations (RR ou P en mm), d'évapotranspiration potentielle de Penman (ETPP en mm) et de température de l'air (en °C) par jour depuis 1986. On pourra alors calculer le bilan hydrique (P-ETP en mm) moyen par mois de 1986 à 2014 puis en 2015 et 2016, les deux années concernées par l'étude.

8. Analyses statistiques :

Les analyses statistiques sont effectuées avec le logiciel R (RStudio, version 1.1.463.0).

Sur les valeurs de traits racinaires (SRL, SLA, RTD, Diam, C1, C2 RDMC morpho et RDMC total) et aériens (LDMC, SLA et H) ont été testés les effets traitement et bloc ainsi que leurs interactions avec un test d'ANOVA. L'ANOVA est utilisée selon un modèle linéaire simple. On réalise ensuite une étude des contrastes avec la fonction « lsmeans » pour comparer toutes les possibilités d'interactions traitement-bloc.

IV. Résultats :

1. Conditions climatiques :

Les données climatiques journalières récoltées sur le dispositif expérimental depuis 1986 ont permis d'établir une tendance sur les variations de précipitations et températures moyennes par mois sur une période de 28 ans (entre 1986 et 2014).

Ces données sont comparées avec les températures moyennes et les cumuls de précipitations des années 2015 et 2016.

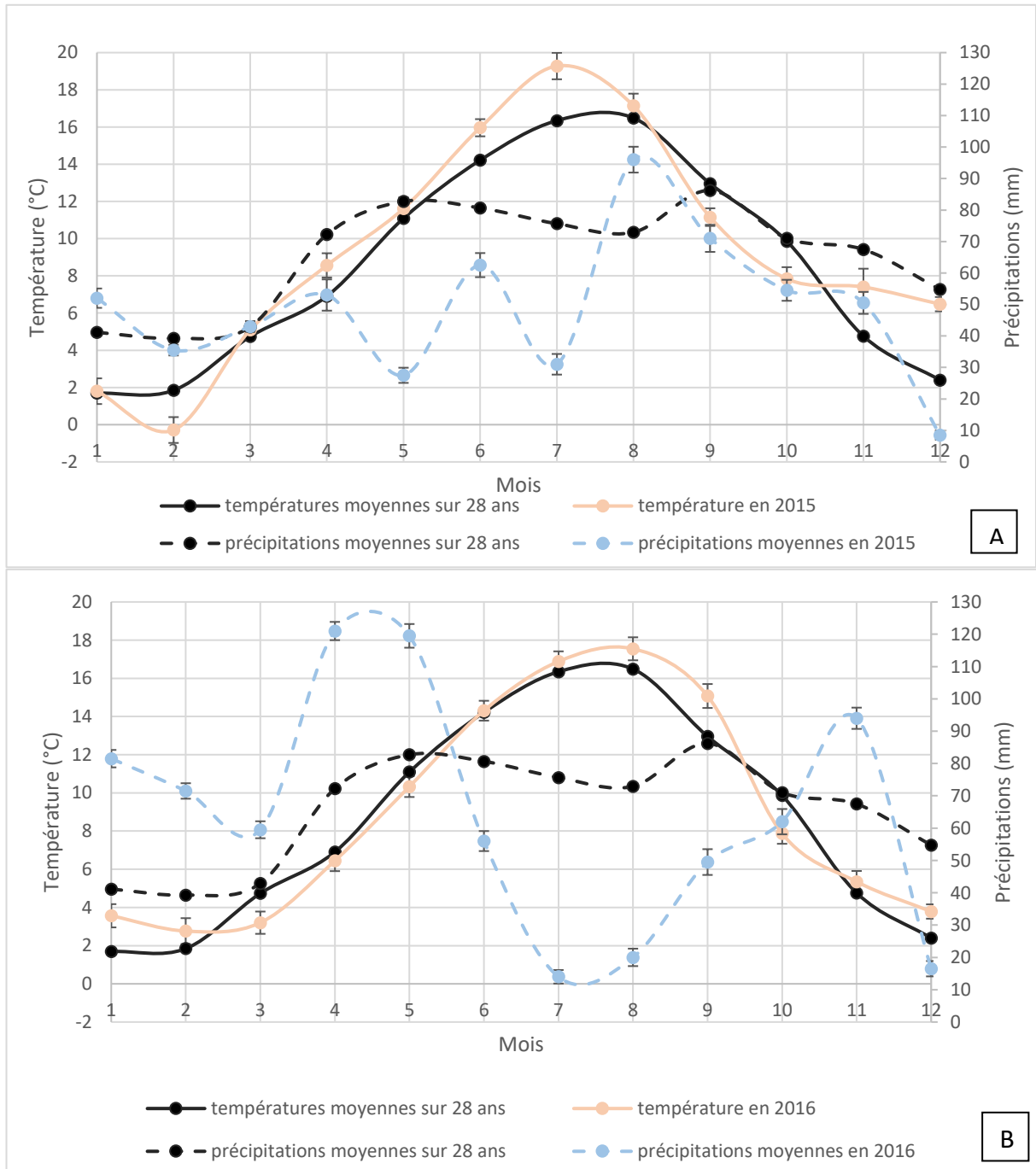


Figure 4 (A et B) : Moyennes des températures de l'air (en °C) et cumul des précipitations (en mm) par mois sur une période de 28 ans entre 1986 et 2014 et en 2015 (A) et en 2016 (B) sur le dispositif expérimental du SOERE de Theix

La tendance établie sur 28 ans montre des températures basses (autour de 2°C) de janvier à février et en décembre. Ces dernières remontent progressivement pour atteindre leur maximum vers août à un peu plus de 16°C, puis redescendent régulièrement dans les derniers mois de l'année. Cette tendance est plutôt suivie en 2015 et 2016. Concernant l'année 2015, on remarque en revanche que la température maximale est atteinte plus tôt (19°C en juillet) et que les températures hivernales sont légèrement plus hautes en novembre et décembre. En février, la température passe en dessous de zéro. Pour l'année 2016, les températures sont légèrement plus chaudes en été, mais également en hiver, où elles surpassent la tendance 1986/2014 d'environ 2°C.

Les précipitations moyennes entre 1986 et 2014 sont basses en hiver de janvier à mars et en décembre (40 à 55 mm par mois), puis remontent jusqu'en mai et se stabilisent autour de 75 mm par mois. Les plus grosses précipitations tombent en septembre (85 mm) puis diminuent lentement. Les précipitations des années 2015 et 2016 ne suivent pas du tout la tendance sur 28 ans. En effet, lors de ces deux années, les précipitations fluctuent beaucoup entre chaque mois. Cependant, ces dernières sont généralement plus basses en 2015 que sur les 28 ans avec des minimums très marqués en mai et juillet à environ 30 mm au lieu d'environ 80 mm de précipitations sur la moyenne des années précédentes. On constate un pic en août avec un peu moins de 100 mm de pluie, qui diminue aussitôt pour arriver à des précipitations quasiment nulles en décembre. En 2016 en revanche, on note clairement quatre extrêmes. On a ainsi une baisse des précipitations jusqu'en mars avec 60 mm de pluie, puis un premier maximum en avril (120 mm). Les précipitations diminuent fortement et restent faibles en juillet-août (respectivement 15 et 20 mm) pour réaugmenter et atteindre 95 mm en novembre. On note ensuite une nouvelle diminution jusqu'en décembre (15 mm).

On peut donc dire que l'année 2015 était assez sèche, surtout du début du printemps au milieu de l'été avec des précipitations généralement plus faibles que les moyennes annuelles. L'année 2016 aussi a eu un été plutôt sec, mais également un hiver-printemps humide avec des précipitations plus hautes que la tendance 1986-2014.

Les données de précipitations et d'évapotranspiration ont également permis de calculer un bilan hydrique (P-ETP, précipitations-évapotranspiration) par dates de prélèvement des IGC. Le bilan hydrique permet de connaître la disponibilité en eau pour les végétaux.

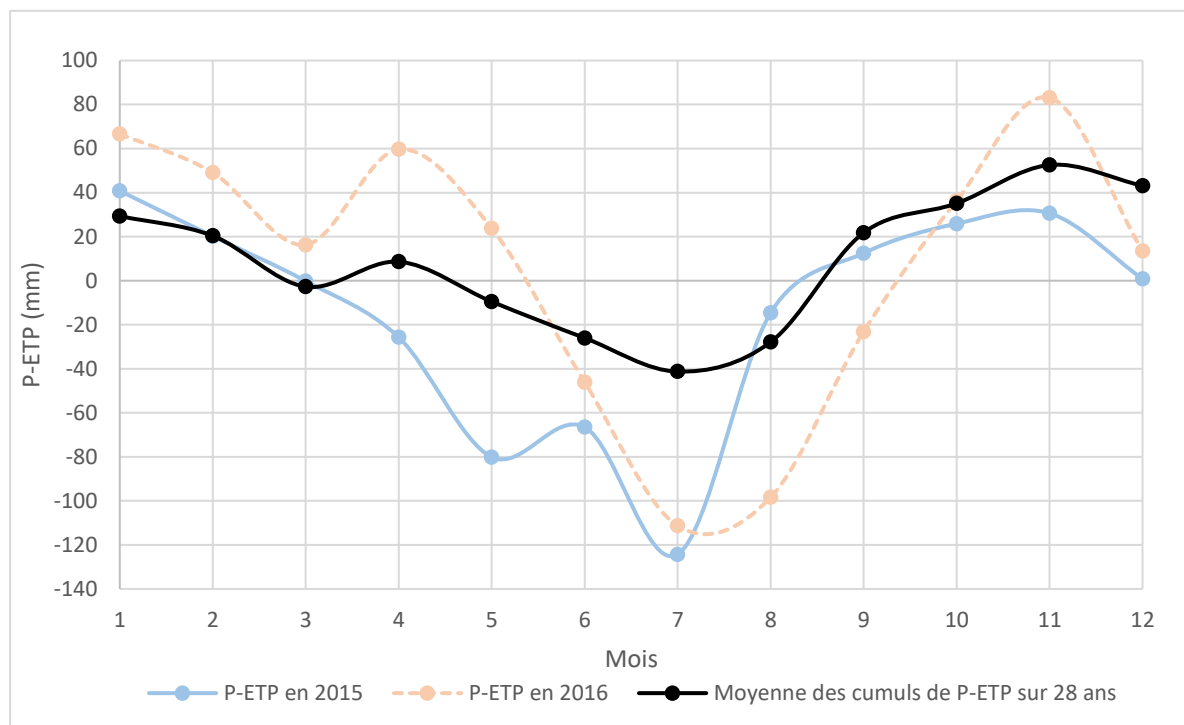


Figure 5 : Représentation des cumuls de bilans hydriques (P-ETP) en mm par mois sur la période de 28 ans de 1986 à 2014 et sur les années 2015 et 2016

La tendance sur 28 ans montre que l'eau amenée par les précipitations serait plus disponible sur la période automne/hiver entre les mois de septembre et février avec un maximum en novembre de 50 mm. Entre mai et août, le bilan hydrique est négatif avec un minimum de -40 mm en juillet. Cela paraît logique puisqu'en général, il pleut moins en été. Cela concorde bien avec les deux graphiques précédents. Un bilan hydrique négatif signifie que les plantes perdent plus d'eau par évapotranspiration qu'elles n'en gagnent par les précipitations.

L'évolution de P-ETP en 2015 suit approximativement la moyenne des 28 ans de janvier à mars et d'août à décembre. Le bilan hydrique est seulement plus marqué d'avril à juillet avec un minimum beaucoup plus bas en juillet de -125 mm. La courbe 2015 s'éloigne également en décembre pour avoir un bilan hydrique plus faible de 40 mm par rapport à la tendance annuelle.

En 2016, on constate que le bilan hydrique suit celui de la période 1986-2014 mais avec une amplitude plus forte. En effet, entre les mois d'octobre et de mai, P-ETP est positif avec un maximum en novembre de 80 mm. Entre juin et septembre, le bilan hydrique est négatif, avec un minimum en juillet de -110 mm.

Les années 2015 et 2016 présentent donc par rapport à la moyenne 1986-2014 des déficits hydriques très marqués.

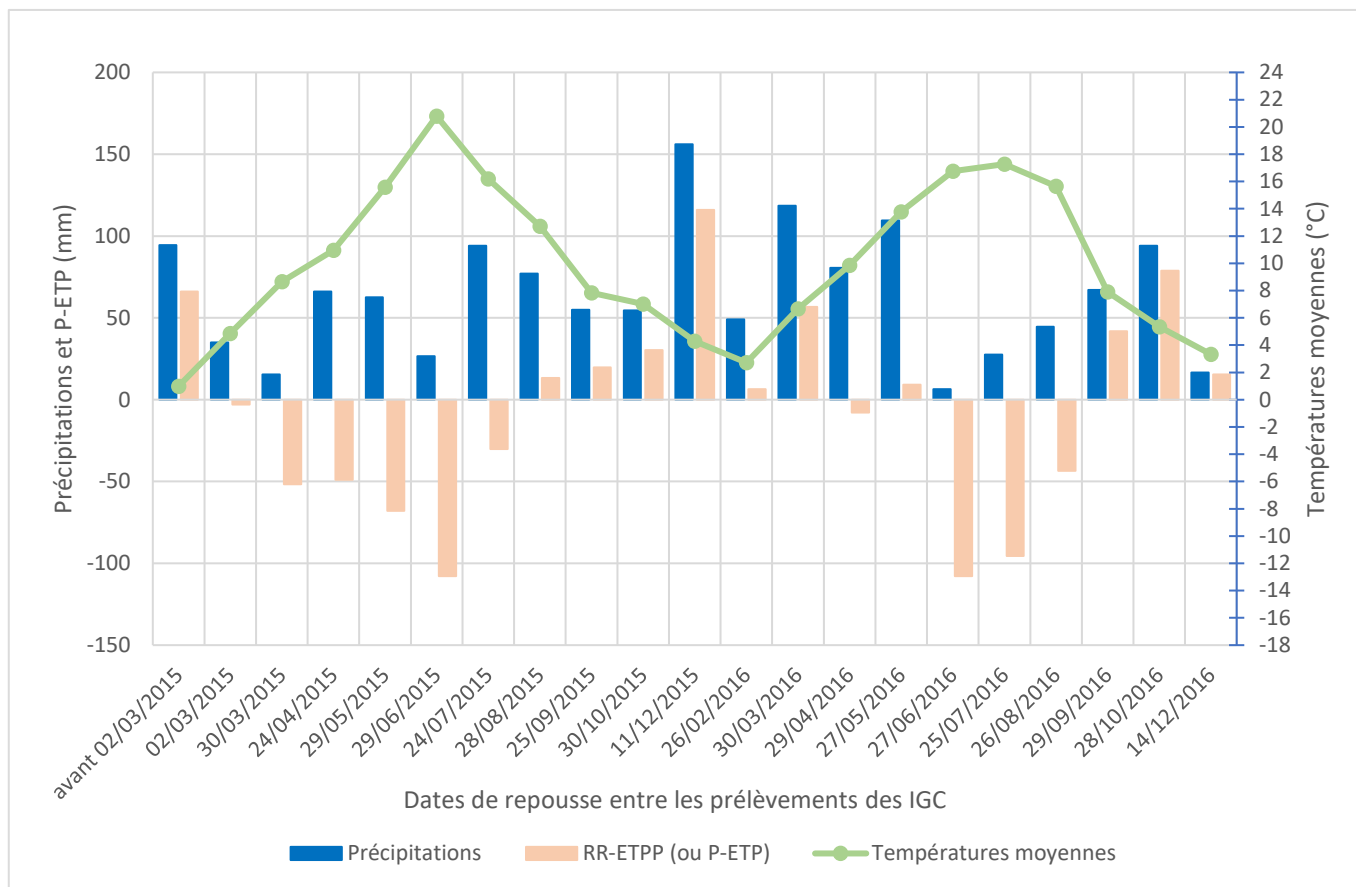


Figure 6 : Dynamique climatique sur les années 2015 et 2016 avec représentation de la moyenne des températures (en °C), la somme des précipitations (en mm) et le bilan hydrique P-ETP (en mm) par dates de prélèvement des IGC sur le site de Theix.

On voit que les températures suivent la même tendance entre les deux années avec des maximums fin juin en 2015 et fin juillet en 2016 (respectivement de 21 et 17.5°C).

On remarque, que de manière générale, l'évolution du bilan hydrique est inverse à l'évolution de la température. En effet, lorsque la température augmente, le bilan hydrique devient négatif. On peut alors supposer que plus la température augmente et plus les végétaux perdent de l'eau par évapotranspiration.

2. Dynamique de la croissance racinaire :

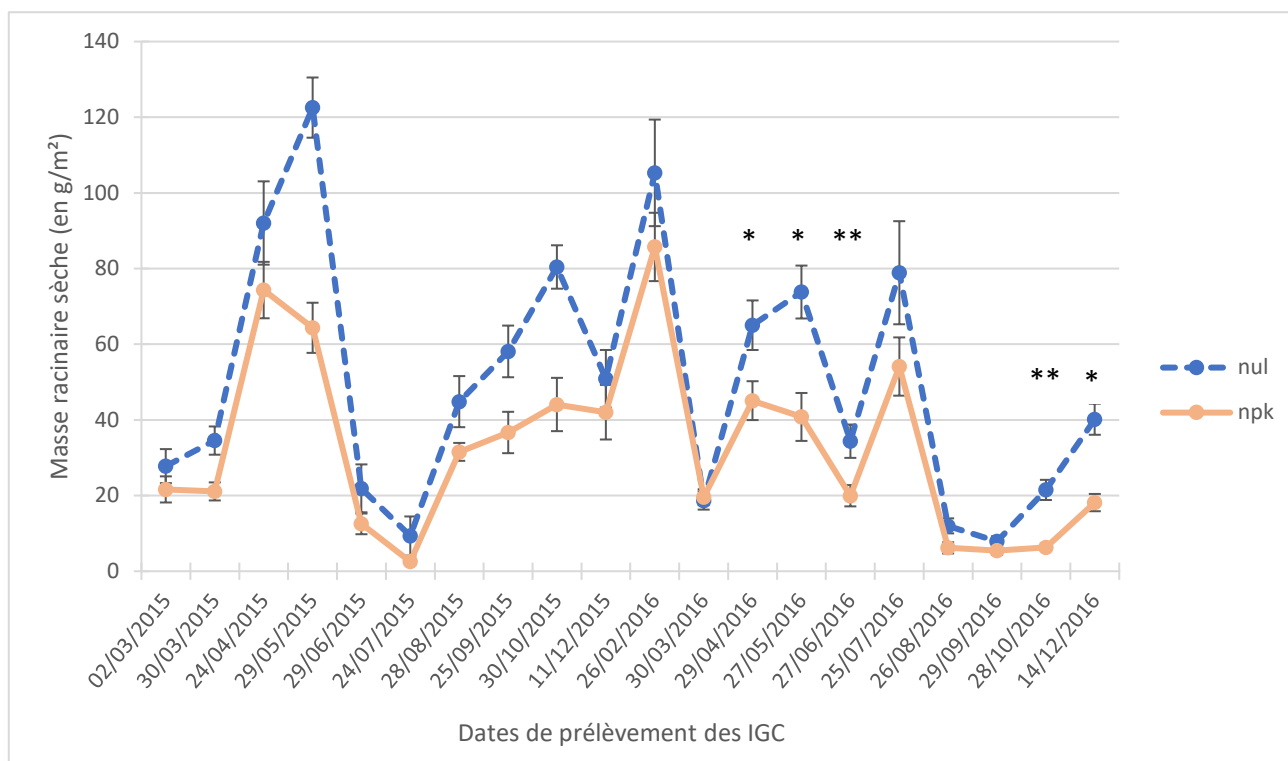


Figure 7 : Masse racinaire sèche moyenne produite dans les IGC entre chaque dates de prélèvements entre 2015 et 2016 en g/m² associée aux erreurs standard et par traitement (fauche nulle = nul et fauche fertilisée = npk). Les valeurs sont calculées avec n=4 car il y a 4 répétitions par parcelles. Les astérisques indiquent les différences significatives entre les traitements (analyses statistiques réalisées seulement pour l'année 2016), (* = p-value < 0.05, ** = p-value < 0.01).

La figure 7 représente la dynamique de production racinaire en masse sèche à chaque date de prélèvements des IGC, de 2015 à 2016.

On note que le traitement fertilisé et le traitement nul suivent la même tendance. La production de masse racinaire est toutefois plus élevée en traitement nul.

En 2015, on a une production racinaire faible en fin d'hiver (du 2 au 30 mars) qui remonte au printemps et atteint un pic en avril de 75 g/m² pour le traitement npk et en mai de 125 g/m² pour le traitement fauche nulle. A compter de ces dates, la production racinaire baisse et devient minimale au 24 juillet. Elle augmente ensuite jusqu'au prélèvement fin octobre tout en étant plus marqué pour le traitement nul, puis décroît jusqu'au prélèvement de mi-décembre (avec une diminution toujours plus marquée en traitement nul).

Le premier prélèvement d'IGC de 2016 se fait le 26 février. On constate à cette date un pic de croissance racinaire. Vient ensuite une forte décroissance jusqu'au prélèvement suivant puis une remontée jusqu'en avril pour le traitement npk et mai pour celui non fertilisé. La croissance racinaire est plus faible en juin. La fin d'année 2016 est très différente de celle de 2015 : on peut noter une inversion des tendances avec une augmentation de la biomasse racinaire en juillet et une baisse sur les deux prélèvements suivants. Enfin, on remarque une croissance de la biomasse racinaire en début hiver.

La tendance sur 2015 et 2016 montre que la croissance racinaire est globalement plus importante sur le traitement fauche nulle. On remarque également que en 2016, on avait quelques différences significatives à certaines dates. En effet, des différences d'effets de traitement sont marqués pour les trois prélèvements au printemps (au 29/04/2016, 27/05/2016 et 27/06/2016) ainsi que lors des deux prélèvements en hiver (28/10/2016 et 14/12/2016). Ces dates étaient déjà marquées en 2015 (Laetitia HACKER, 2018) aux mois de mars (* = p-value < 0.05), en mai (** = p-value < 0.01) et au mois d'octobre (***) = p-value < 0.001).

3. Effet des traitements nul et npk sur les productions racinaires et aériennes :

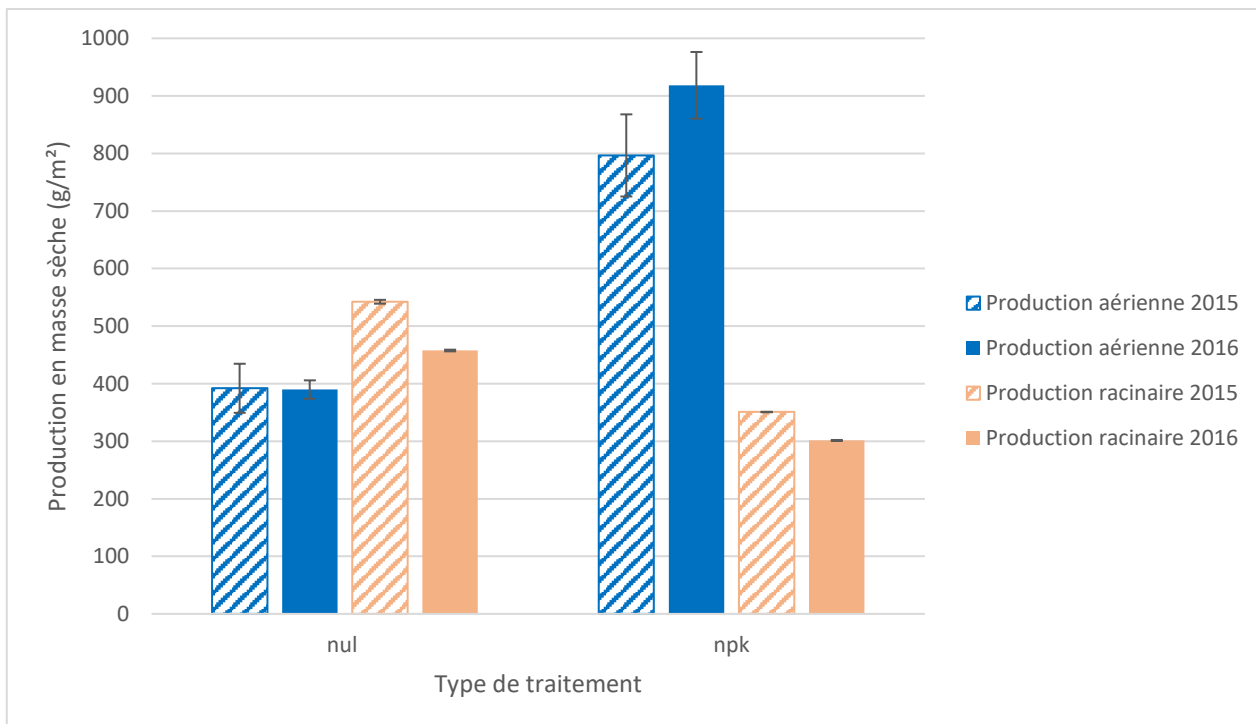


Figure 8 : Productions aériennes et racinaires annuelles (en g/m²) avec leurs erreurs standards des années 2015 et 2016 en fonction des deux types de traitement (fauche nulle = nul et fauche fertilisée = npk). La valeur de production racinaire est calculée sur le cumul des 10 dates de prélèvement des IGC et la valeur de production aérienne est déterminée sur le cumul de biomasse des trois fauches annuelles.

Effets / P-values	Production aérienne	Production racinaire
Traitement	9.83×10 ⁻⁷ ***	8.424×10 ⁻⁷ ***
Année	0.2666	0.004186 **
Interactions	0.2500	0.394889

Tableau 1 : Tableau représentant les p-values (différences significatives) des croissances racinaires et aériennes en prenant en compte les facteurs années (2015 et 2016) et les traitements (fauche nulle et fauche npk) ainsi que les interactions entre ces derniers, en lien avec la figure 8. Les astérisques indiquent les différences significatives (** = p-value < 0.01 et *** = p-value < 0.001)

En traitement fauche nul, la production aérienne annuelle reste similaire entre 2015 et 2016, autour de 400 g/m² de matière sèche. La production racinaire a quant à elle été moins importante en 2016 qu'en 2015 avec une différence significative (p-value < 0.01).

En traitement fauche npk, on remarque que la production aérienne, déjà très forte en 2015 (deux fois plus qu'en fauche nulle la même année), a encore augmentée en 2016. On a dans ce cas-là une différence significative avec une p-value < 0.001, le traitement a donc un impact important. La production racinaire a en revanche diminué sur l'année 2016 et passe de 350 g/m² en 2015 à 300 en 2016 (la p-value est également < 0.001 en prenant en compte l'effet traitement).

Les différents types de traitements ont donc un effet sur les productions aériennes et racinaires. Le traitement npk favorise le développement des végétaux au niveau de la biomasse aérienne plutôt qu'au niveau racinaire.

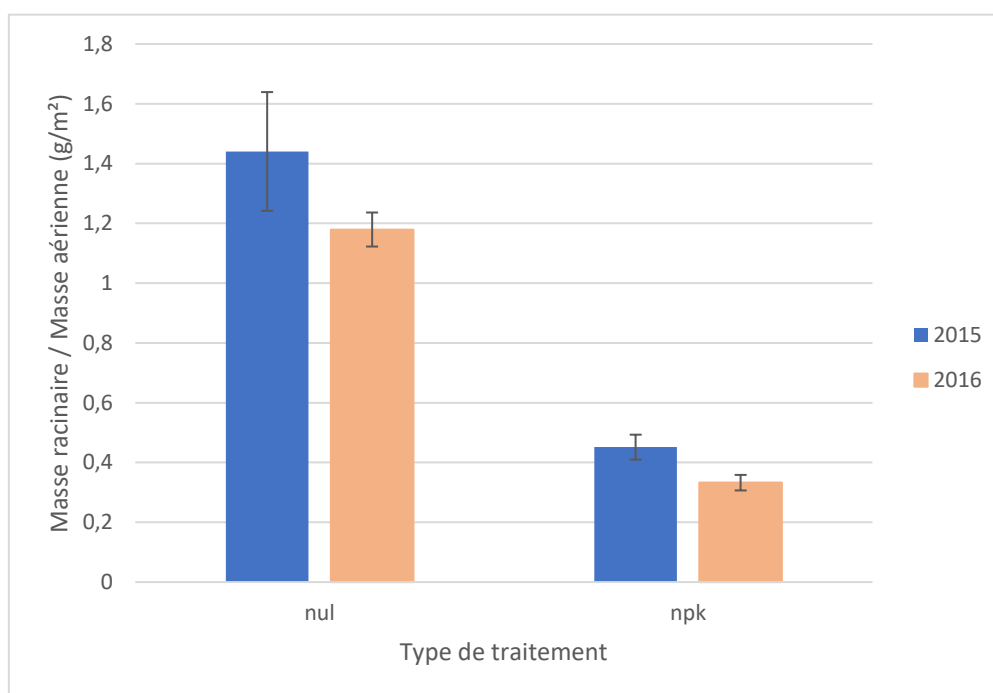


Figure 9 : Rapport du cumul de la masse racinaire sur le cumul de la masse aérienne en 2015 et 2016 en fonction du type de traitement avec son erreur standard (qui est représentée par les barres d'erreur). Le cumul de masse racinaire est fait grâce au cumul de biomasse récupérée sur les dix dates de prélèvement des IGC et le cumul de biomasse aérienne est fait sur les trois dates de fauche annuelle.

Si le ratio masse racinaire sur masse aérienne est supérieur à 1, cela signifie que la production racinaire était plus importante que la production aérienne pour la même période.

On constate ici que le ratio est supérieur à 1 pour 2015 et 2016 en traitement fauche nulle, avec respectivement des valeurs de 1.44 et 1.18. En revanche, en traitement fertilisé npk, le ratio est inférieur à 1 pour 2015 et 2016, avec des valeurs respectives de 0.45 et 0.33.

On peut en déduire que dans le traitement nul, la biomasse principalement produite est la biomasse racinaire alors qu'en traitement fertilisé, les végétaux produisent plus de parties aériennes.

4. Traits racinaires et aériens :

Traits racinaires	Fauche nulle	Fauche fertilisée	p-value
SRL (m/g)	274.6 ± 21.53	269.0 ± 21.83	0.8683
SRA (cm ² /g)	1631 ± 124.2	1605 ± 70.32	0.8648
RTD (g/cm ³)	0.092 ± 0.004	0.085 ± 0.002	0.2815
Diam (mm)	0.200 ± 0.006	0.207 ± 0.010	0.6191
C1 (<0.2 mm)	0.698 ± 0.022	0.705 ± 0.025	0.8089
C2 (>0.2 mm)	0.302 ± 0.022	0.295 ± 0.025	0.8089
RDMC morpho (g/g)	0.130 ± 0.004	0.137 ± 0.003	0.12652
RDMC total (g/g)	0.132 ± 0.005	0.138 ± 0.003	0.3032
Traits aériens			
LDMC (g/g)	0.248 ± 0.017	0.237 ± 0.013	0.6654
SLA (cm ² /g)	223.8 ± 20.10	291.0 ± 36.20	0.1803
H (cm)	68.84 ± 13.19	85.84 ± 8.987	0.4252

Tableau 2 : Valeurs des traits racinaires et aériens selon le traitement (fauche nulle non fertilisée ou fauche fertilisée avec apport de npk) en 2016. Chaque moyenne de trait est associée à son erreur standard. Les traits racinaires sont : la longueur spécifique des racines (SRL en m/g), la surface spécifique racinaire (SRA en cm²/g), la densité des tissus racinaires (RTD en g/cm³), le diamètre racinaire (diam en mm), la proportion de racines ayant un diamètre inférieur à 0.2 mm (C1) ou supérieur à 0.2 mm (C2) et le taux de matière sèche des racines des échantillons (RDMC total) et des sous-échantillons (RDMC morpho) en g/g. Les traits aériens sont le taux de matière sèche des feuilles (LDMC en g/g), la surface spécifique des feuilles (SLA en cm²/g) et la hauteur reproductive (H en cm). Ces traits sont déterminés en faisant la moyenne des 4 répétitions par parcelles puis la moyenne des 4 parcelles de chaque traitement. La p-value indique les différences significatives entre les traitements (= p-value < 0.05).*

Dans ce tableau sont regroupés les traits agrégés de 2016 des communautés végétales des parcelles fertilisées ou non. Les traits aériens sont mesurés sur les espèces les plus abondantes dans la couronne autour de l'IGC (celles représentant au moins 85% de la masse totale de la couronne).

On ne constate aucun effet significatif des traitements entre les parcelles avec et sans apport de npk. En 2016, les différents traitements n'ont donc pas eu d'effets significatifs sur les productions racinaires et aériennes au niveau des IGC.

La comparaison des valeurs du tableau permet de montrer qu'en traitement fauche nulle, la longueur spécifique des racines (SRL) et la surface spécifique des racines (SRA) seraient plus importantes qu'en traitement fertilisé.

V. Discussion :

La méthode des Ingrowth-core a permis de définir la production racinaire sur les années 2015 et 2016 mois par mois. La production de biomasse souterraine est impactée par les conditions climatiques et par le traitement appliqué. Les résultats seront discutés principalement sur l'année 2016, année nous intéressant plus particulièrement puisque les résultats 2015 ont déjà été discutés (rapport de Paul MOREAU).

1. Impact des conditions climatiques sur la production racinaire :

La production de biomasse souterraine est influencée par les conditions climatiques. On remarque que les périodes les plus productives se situent entre le printemps et l'été avec deux pics de production en mai et juillet. Cette période, entre avril et juillet, correspond à une période où les températures de l'air sont plutôt clémentes et où les précipitations étaient assez importantes. La température moyenne entre ces quatre mois est d'environ 12°C, ce qui est très supérieur à la moyenne annuelle du site (8.7°C), avec une augmentation constante des valeurs jusqu'en juillet. Selon (Garcia-Pausas et al. 2011), il y aurait un lien entre la température de l'air, les précipitations et la production de biomasse racinaire. Cette production et activité racinaire seraient favorisées par l'augmentation des températures de l'air ainsi que par un accroissement des précipitations. Cette situation est bien observée en avril. Une fois le mois de juillet passé, on voit une chute de la production de biomasse racinaire. La température, qui continue d'augmenter sur le mois suivant, devient sûrement trop importante pour le développement optimal des racines des végétaux. C'est également en été que les plantes commencent leur phase de floraison, les ressources comme le carbone sont donc dirigées principalement en direction du développement de l'appareil reproducteur et non de la biomasse souterraine.

On remarque également en 2016 un pic de précipitation très important en avril et mai qui va diminuer très rapidement pour devenir quasiment nul en juillet. La période avril-mai est marquée par un bilan hydrique assez stable. Les végétaux reçoivent donc assez d'eau pour développer leur biomasse racinaire de manière optimale. En revanche, en juin/juillet le bilan hydrique est au plus bas, ce qui peut expliquer la décroissance rapide de la production racinaire. Les plantes ne reçoivent plus assez d'eau, élément qui devient alors un facteur limitant pour leur croissance. Les plantes perdent plus d'eau par évapotranspiration qu'elles n'arrivent à en gagner par la pluie. Ce facteur empêcherait alors les végétaux de produire des racines assez grandes pour pouvoir atteindre l'eau située en profondeur dans le sol. En raison des températures plus importantes en été et de la situation de stress hydrique due à la diminution des précipitations, les plantes doivent alors fermer leurs stomates pour limiter les pertes d'eau par évapotranspiration. En hiver, le facteur principal responsable de la diminution de la production racinaire serait plutôt les températures très basses.

2. Impact des traitements :

La production de biomasse souterraine est également influencée par les traitements appliqués sur les parcelles. La manière dont les plantes répartissent les nutriments dans leur organisme dépend de la disponibilité de ces derniers dans le sol. La partie racinaire est plus développée que la partie aérienne lorsque le sol est pauvre en nutriments (Boot et Mensink.,

1990, cité par Hacker, 2017). Dans ce cas-là, la plante cherchera à atteindre ces nutriments en occupant plus d'espace dans le sol et augmentera sa surface d'échange avec le sol. Cela est dû à l'allocation de biomasse préférentiellement vers la partie racinaire lorsque le facteur limitant est souterrain. La production racinaire est ainsi significativement meilleure en 2016 sur les parcelles subissant un traitement fauche nulle que sur celles subissant un traitement avec apport d'azote, phosphore et potassium. Le ratio du cumul de la production racinaire sur le cumul de la production aérienne est donc également plus important sur les parcelles fauche nulle, la production racinaire étant y plus importante que la production de partie aérienne. Les éléments minéraux étant plus présents dans le sol des parcelles en fauche fertilisée, les racines n'auront alors pas besoin de s'étendre en profondeur pour avoir accès aux ressources. Les plantes s'appliqueront plutôt à développer leur biomasse aérienne pour un meilleur accès à la lumière en augmentant leur taille par exemple. En revanche, sur les parcelles fauche nulle, la biomasse racinaire sera soumise à plus de compétition et aura tendance à augmenter sa surface d'échange avec le sol pour capter plus de nutriments, au détriment des parties aériennes. Ces plantes possèdent également une meilleure capacité de réinvestissement des nutriments dans leur organisme lorsqu'elles sont coupées ou que les feuilles tombent pour éviter un maximum de pertes (F. Louault, communication personnelle).

3. Effet des traitements sur les traits morphologiques :

Les traits racinaires sont influencés également par les types de traitements utilisés et changent donc selon le gradient de fertilisation. Les réponses des traits aux traitements sont régies par la plasticité morphologique des végétaux. La plasticité dépendra ici de la disponibilité en nutriment dans le sol.

Dans les parcelles fauche nulle, on retrouve chez les plantes au niveau racinaire des traits moyens plus élevés pour la SRL (longueur spécifiques des racines) et pour la SRA (surface spécifique racinaire) même si les différences ne sont pas significatives. On obtient aussi des racines de diamètre plus faibles, la majorité étant inférieure à 0.2 mm de diamètre, mais ayant une densité plus élevée. Une telle densité pourrait signifier que ces racines possèdent des tissus assez résistants et ayant potentiellement une plus grande durée de vie. Les traits aériens nous donnent des teneurs en matière sèche (LDMC) élevées mais des hauteurs et des SLA (surface spécifique des feuilles) plus faibles.

En fauche fertilisée, les valeurs moyennes de ces traits sont opposées. On a ainsi des longueurs racinaires et des surfaces spécifiques plus faibles mais des diamètres de racines plus importants pour une densité racinaire plus faible pour les espèces présentes sur ces parcelles. Quant aux traits aériens, on obtient des SLA et hauteurs plus élevées.

Ces traits sont représentatifs des stratégies que l'on attendrait des plantes sur leurs parcelles respectives. En effet, les traits obtenus sur les parcelles en fauche nulle correspondent à une stratégie conservatrice. Cette stratégie permet aux végétaux de s'adapter aux milieux pauvres en nutriments dans le sol. La taille des racines et la surface d'échange importante permet aux plantes d'aller chercher leurs éléments nutritifs en occupant plus d'espace du sol. La densité racinaire permet également de dire que les racines sont capables de mieux résister dans le temps. En parcelles fauche fertilisée, les traits correspondent à une stratégie exploitative. Cette stratégie est caractérisée par une allocation de biomasse dans les

parties aériennes, indiquée par des hauteurs plus importantes. En revanche, la biomasse racinaire sera moins développée car les racines trouvent les éléments dont la plante a besoin à leur portée.

4. Regard critique :

La méthode des IGC présentait une limite principale : les racines pivots que l'on peut trouver chez les dicotylédones comme par exemple chez *Taraxacum officinale*, ne sont pas prises en compte dans le suivi de biomasse racinaire. En effet, les filets des IGC ne permettent de récupérer que les racines ayant une poussée horizontale.

Une autre limite de cette méthode est le fait que les IGC ne permettent de récupérer les racines que sur les 20 premiers cm de profondeur alors que le système racinaire peut être bien plus étendu. Cependant, on sait que la majorité des racines se trouvent dans ces 20 cm de sol.

Conclusion :

Cette étude menée de 2015 à 2016 a permis d'établir une dynamique de la croissance de la biomasse racinaire en prairie permanente selon un gradient de fertilisation.

Cette étude a montré que les productions de biomasse aériennes et racinaires étaient dépendantes du mode de gestion de la prairie. On a également pu constater que les traits morphologiques racinaires et aériens répondaient à une certaine plasticité concernant le gradient de fertilisation et caractérisaient les stratégies pouvant être utilisées par les plantes.

On voit ainsi une production plus importante de biomasse racinaire sur les parcelles non fertilisées. La production de biomasse souterraine est cependant et logiquement plus faible en parcelle fauchée avec apport de fertilisant azoté. La production de biomasse aérienne suit une tendance inverse : la production aérienne est plus importante en fauche fertilisée et faible en fauche nulle.

Les analyses morphologiques des racines ont montré que les plantes utilisaient deux stratégies différentes selon le type de gestion de la parcelle. Les traits racinaires (comparés aux traits aériens) mesurés ont permis de voir qu'en traitement fauche nulle les plantes utilisaient une stratégie de conservation des ressources en développant leur système racinaire davantage pour atteindre les éléments nutritifs plus profondément dans le sol. En revanche, en traitement fauche fertilisée, les plantes possédaient des traits caractérisant une stratégie exploitative d'acquisition rapide des ressources. Ces stratégies permettent aussi de constater le phénomène d'allocation de la biomasse : en stratégie conservatrice, la biomasse est allouée vers les parties racinaires et en exploitatif, la biomasse est dirigée vers les parties aériennes.

On sait que le système racinaire a permis de stocker une grande partie du carbone présent dans les sols des prairies permanentes. On pourrait donc en déduire qu'une gestion des prairies sans fertilisants serait plus utile dans la recherche de la limitation des gaz à effet de serre. Cependant, les prairies permanentes ayant également une vocation de production fourragère ou de pâturage animal, il ne faut pas non plus négliger l'utilisation de fertilisants qui permettraient de produire plus de biomasse aérienne. Un équilibre est donc à déterminer pour obtenir un système racinaire permettant de stocker assez de carbone mais aussi d'avoir une biomasse fourragère assez conséquente.

Références :

- Bartout, Axel. s. d., 2014, « Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente pâturée par des bovins », Master 1 Biologie et Environnement mention Génomique Ecophysiologie et Productions Végétales. Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand
- Bissohong, Camille. s. d., 2018 « Effets du pâturage et de la fertilisation sur la production souterraine et les traits racinaires de différentes prairies permanentes », DUT Génie Biologique Option Génie de l'Environnement. Université Clermont Auvergne
- Bulon, Léa. s. d., 2015 « Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente pâturée par des bovins. », DUT Génie Biologique Option Génie de l'Environnement. Université Aix-Marseille
- Duhazé, Leny. s. d., 2017 « Dynamique de la croissance racinaire en prairie permanente en réponse au pâturage et à la fertilisation », Génie Biologique Option Génie de l'Environnement. Université Cergy-Pontoise
- Garcia-Pausas, Jordi, Pere Casals, Joan Romanyà, Sara Vallecillo, et Maria-Teresa Sebastià. 2011. « Seasonal Patterns of Belowground Biomass and Productivity in Mountain Grasslands in the Pyrenees ». *Plant and Soil* 340 (1-2): 315-26. DOI 10.1007/s11104-010-0601-1
- Hacker, Laetitia. s. d., 2017 « Effet de la fertilisation NPK sur la dynamique de croissance racinaire en prairie permanente fauchée », Génie Biologique Option Agronomie. Université Lyon 1
- Henneron, Ludovic, Camille Cros, Catherine Picon-Cochard, Vida Rahimian, et Sébastien Fontaine. 2019. « Plant Economic Strategies of Grassland Species Control Soil Carbon Dynamics through Rhizodeposition ». *Journal of Ecology*
- Herfurth, Damien. 2015. « Impact des pratiques de gestion sur le stockage du Carbone dans le sol des écosystèmes prairiaux », Thèse de doctorat, Université Clermont-Auvergne
- Louault, Frédérique, V. D. Pillar, Jocelyne Aufrere, Eric Garnier, et Jean-François Soussana. 2005. « Plant Traits and Functional Types in Response to Reduced Disturbance in a Semi-Natural Grassland. » *Journal of Vegetation Science* 16 (2): 151-60.
- Moreau, Paul. s. d., 2016 « Effet de la fertilisation NPK sur la production et les traits d'une prairie permanente fauchée », Master 1 Biodiversité Ecologie Environnement mention Patrimoine Naturel et Biodiversité. Université Rennes 1

« Pac 2015 : cartes départementales des prairies permanentes sensibles ». s. d.
<https://agriculture.gouv.fr/pac-2015-cartes-departementales-des-prairies-permanentes-sensibles>.

Picon-Cochard, Catherine, Remi Pilon, et Sandrine Revaillo. s. d. « Plasticity of Grass Root Functional Traits and Root Mass in Response to Cutting Frequency and N Fertilisation. », In: *7th ISRR Symposium Root Research and Applications September 2-4, 2009, Vienna/Austria* 31:179-408

Pilon, Rémi. s. d. « Dynamique du système racinaire de l'écosystème prairial et contribution au bilan de carbone du sol sous changement climatique », *Agricultural Sciences* Université Blaise Pascal Clermont Ferrand

« Quelle évaluation économique pour les services écosystémiques rendus par les prairies en France métropolitaine ? » s. d.
<https://agriculture.gouv.fr/quelle-evaluation-economique-pour-les-services-ecosystemiques-rendus-par-les-prairies-en-france>.

Soussana, J. F., T. Tallec, et V. Blanfort. 2010. « Mitigating the Greenhouse Gas Balance of Ruminant Production Systems through Carbon Sequestration in Grasslands ». *Animal* 4 (3): 334-50.

Violle et al., 2007, let the concept of trait be functional! *oikos*, 116:882-892

Table des figures et des tableaux:

Figure 1 : Présentation du dispositif SOERE - ACBB de l'INRAE de Theix (Saint Genès Champanelle)	6
Figure 2 : Schéma de la mise en place et du prélèvement des Ingrowth-core (Source : Anpp-Bnpp-THE-LAQ_08Mar2017_Red_FG, LOUAULT)	8
Figure 3 : Présentation du traitement des échantillons avec dans l'ordre : IGC prélevé, lavage des racines de l'IGC sur tamis, biomasse racinaire formant l'échantillon et pesée en frais et sec de l'échantillon (Source : Anpp-Bnpp-THE-LAQ_08Mar2017_Red_FG, LOUAULT)	9
Figure 4 (A et B) : Moyennes des températures de l'air (en °C) et cumul des précipitations (en mm) par mois sur une période de 28 ans entre 1986 et 2014 et en 2015 (A) et en 2016 (B) sur le dispositif expérimental du SOERE de Theix.....	11
Figure 5 : Représentation des cumuls de bilans hydriques (P-ETP) en mm par mois sur la période de 28 ans de 1986 à 2014 et sur les années 2015 et 2016.....	13
Figure 6 : Dynamique climatique sur les années 2015 et 2016 avec représentation de la moyenne des températures (en °C), la somme des précipitations (en mm) et le bilan hydrique P-ETP (en mm) par dates de prélèvement des IGC sur le site de Theix.	14
Figure 7 : Masse racinaire sèche moyenne produite dans les IGC entre chaque dates de prélèvements entre 2015 et 2016 en g/m ² associée aux erreurs standard et par traitement (fauche nulle = nul et fauche fertilisée = npk). Les valeurs sont calculées avec n=4 car il y a 4 répétitions par parcelles. Les astérisques indiquent les différences significatives entre les traitements (analyses statistiques réalisées seulement pour l'année 2016), (* = p-value < 0.05, ** = p-value < 0.01).	15
Figure 8 : Productions aériennes et racinaires annuelles (en g/m ²) avec leurs erreurs standards des années 2015 et 2016 en fonction des deux types de traitement (fauche nulle = nul et fauche fertilisée = npk). La valeur de production racinaire est calculée sur le cumul des 10 dates de prélèvement des IGC et la valeur de production aérienne est déterminée sur le cumul de biomasse des trois fauches annuelles.....	16
Figure 9 : Rapport du cumul de la masse racinaire sur le cumul de la masse aérienne en 2015 et 2016 en fonction du type de traitement avec son erreur standard (qui est représentée par les barres d'erreur). Le cumul de masse racinaire est fait grâce au cumul de biomasse récupérée sur les dix dates de prélèvement des IGC et le cumul de biomasse aérienne est fait sur les trois dates de fauche annuelle.....	17
Tableau 1 : Tableau représentant les p-values (différences significatives) des croissances racinaires et aériennes en prenant en compte les facteurs années (2015 et 2016) et les traitements (fauche nulle et fauche npk) ainsi que les interactions entre ces derniers, en lien avec la figure 8. Les astérisques indiquent les différences significatives (** = p-value < 0.01 et *** = p-value < 0.001).....	16
Tableau 2 : Valeurs des traits racinaires et aériens selon le traitement (fauche nulle non fertilisée ou fauche fertilisée avec apport de npk) en 2016. Chaque moyenne de trait est associée à son erreur standard. Les traits racinaires sont : la longueur spécifique des racines (SRL en m/g), la surface spécifique racinaire (SRA en cm ³ /g), la densité des tissus racinaires (RTD en g/cm ³), le diamètre racinaire (diam en mm), la proportion de racines ayant un	

diamètre inférieur à 0.2 mm (C1) ou supérieur à 0.2 mm (C2) et le taux de matière sèche des racines des échantillons (RDMC total) et des sous-échantillons (RDMC morpho) en g/g. Les traits aériens sont le taux de matière sèche des feuilles (LDMC en g/g), la surface spécifique des feuilles (SLA en cm²/g) et la hauteur reproductive (H en cm). Ces traits sont déterminés en faisant la moyenne des 4 répétitions par parcelles puis la moyenne des 4 parcelles de chaque traitement. La p-value indique les différences significatives entre les traitements (* = p-value < 0.05)..... 18