



# Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés

Loan Madej

## ► To cite this version:

Loan Madej. Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur 2 sites prairiaux pâturés. Milieux et Changements globaux. 2020. hal-03121955

**HAL Id: hal-03121955**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03121955>**

Submitted on 26 Jan 2021

**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.

# MASTER 2 PNB : PATRIMOINE NATUREL ET BIODIVERSITÉ -ANNÉE 2019/2020-

RAPPORT DE STAGE - Octobre 2020

MADEJ LOAN



Dynamique végétale sous l'influence de panneaux  
photovoltaïques sur deux sites prairiaux pâturés

Structure d'accueil : UREP INRAE

Responsable de Stage : Picon-Cochard Catherine, directrice d'unité

Anne-Marie Cortesero, Sébastien Dugravot et Frédéric Ysnel  
Co –responsables Master PNB

## Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier ma maîtresse de stage, Catherine Picon-Cochard, directrice de l'UREP à l'INRAE, pour m'avoir accepté pour ce stage, pour m'avoir fait découvrir l'INRAE, pour sa confiance avec le protocole et sa mise en place. Je tiens également à la remercier de m'avoir accompagné durant sept mois et apporté des conseils judicieux pour les analyses et la rédaction du rapport.

Je tiens à remercier Christophe Cogny de JPEE et Sophie Jacquot de PhotoSol pour nous avoir permis de faire les expériences sur leurs parcs photovoltaïques et leur implication dans toutes les démarches pour que tout se passe au mieux.

Je tiens à remercier Robert Falcimagne et David Colosse pour s'être occupés de toute la partie installation des sondes, capteurs et centrales et sans qui il aurait été difficile d'installer le matériel.

Je tiens à remercier particulièrement Marilyn Roncoroni pour l'aide qu'elle a apportée pour la détermination botanique, mais aussi pour son aide ponctuelle permettant de ne pas crouler sous le travail et bien entendu pour sa compagnie quotidienne à l'UREP.

Je tiens à remercier tout particulièrement Luc Michaud sans qui le travail accompli durant ce stage n'aurait simplement pas été possible, pour toutes ses tâches que je lui ai annexées, pour sa compagnie journalière à l'unité comme sur le terrain. Merci.

Je tiens à remercier l'unité de recherche UREP pour leur accueil et leur bienveillance.

# Sommaire

<b>I) INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>II) MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>5</b>
A) SITES .....	5
B) ZONES D'ETUDES .....	6
1. <i>Zones en exclos</i> .....	7
1.1 Capteurs fixes.....	7
1.2. Suivi de la végétation .....	8
2. <i>Etude dans le reste du site</i> .....	9
C) TRAITEMENTS DES DONNEES .....	10
D) ANALYSES STATISTIQUES .....	10
<b>III) RESULTATS.....</b>	<b>11</b>
A) VEGETATION.....	11
1. <i>Diversité végétale</i> .....	11
2. <i>Variables biologiques</i> .....	13
2.1. Croissance .....	13
2.2. Hauteur de densité .....	14
2.3. Indice NDVI.....	15
2.4. Biomasse .....	16
B) VARIABLES ABIOTIQUES .....	17
1. <i>Sol nu</i> .....	17
1.1. Transect.....	17
1.2. Echelle du parc .....	18
2. <i>Température du sol</i> .....	18
3. <i>Humidité du sol</i> .....	18
4. <i>Rayonnement</i> .....	19
<b>IV) DISCUSSION.....</b>	<b>19</b>
A) DIVERSITE VEGETALE.....	19
B) CROISSANCE .....	21
C) HAUTEUR DE DENSITE .....	22
D) INDICE NDVI.....	22
E) BIOMASSE .....	24
<b>V) CONCLUSION .....</b>	<b>25</b>

## I) Introduction

La demande énergétique mondiale va augmenter avec l'augmentation de la population mondiale vers 9-10 Milliards d'Humains d'ici 2050 (Godfray *et al.*, 2012 in Valle *et al.*, 2017b). Or la production énergétique actuelle participe au changement climatique. Pour réagir aux demandes et limiter le changement climatique en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables se voient être une solution pour y répondre avec notamment l'énergie solaire. Elle a le potentiel de remplacer la part d'énergie carbonée non renouvelable à l'échelle mondiale (Armstrong *et al.*, 2016 ; Adeh *et al.*, 2019) avec un meilleur rendement que les autres énergies renouvelables et que le charbon en prenant en compte les effets directs et indirects liés à l'extraction des ressources (Fthenakis *et al.*, 2009 in Hernandez *et al.*, 2014).

En France, depuis plus de 20 ans (CREXECO, 2019), les énergies renouvelables se sont développées et sont placées comme prioritaires pour la lutte contre le changement climatique. En 2017, sur 16,8% d'énergie électrique dite renouvelable, 1,7% appartenait à l'énergie photovoltaïque (EDF). En 2018, la France comptait au total 412 301 installations photovoltaïques. Celles dépassant la puissance de 250 kWc doivent cependant faire une étude d'impact avant leur installation (Ministère de la transition) par rapport à la norme Haute Qualité Environnementale et le décret gouvernemental de 2009. C'est la région Auvergne-Rhône-Alpes qui compterait le plus d'installations (66 202) avec une puissance de l'ordre de 10% (Eco infos).

Plusieurs facteurs jouent sur l'efficacité énergétique des panneaux solaires. Les conditions climatiques influencent l'efficacité photovoltaïque avec notamment les facteurs environnementaux tel que l'ensoleillement, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative (Adeh *et al.*, 2019). De plus, l'énergie solaire a besoin de surfaces pour l'implantation des parcs photovoltaïques. Il a été montré que les terrains les plus favorables au photovoltaïsme sont les terres cultivées, les prairies et les terres humides (Adeh *et al.*, 2019).

Il en est donc né une préoccupation par rapport à l'utilisation des terres et la concurrence financière et spatiale du photovoltaïsme sur l'agriculture (Marrou *et al.*, 2013 ; Adeh *et al.*, 2019). Pour limiter la concurrence entre la productivité alimentaire et la productivité énergétique, il s'agit de créer des surfaces couplant l'agriculture avec le photovoltaïsme dans l'optique d'une durabilité énergétique et agricole, on parle alors d'agrivoltaïsme. L'objectif est d'augmenter la productivité des terrains en combinant les deux systèmes sur le même terrain pour réduire la compétition pour ce dernier (Dupraz *et al.*, 2011 ; Marrou *et al.*, 2013). Les productivités agricole et photovoltaïque

ont été intégrées dans une formule de LER (Ratio d'Équivalence des Terres) pour quantifier la productivité du système agrivoltaïque par rapport aux deux systèmes sur des terrains séparés en comparant la superficie relative nécessaire pour produire le même rendement et la même production d'énergie sur la même surface terrestre que sur des terrains différents (Dupraz *et al.*, 2011). Il en ressort que le LER était toujours supérieur à 1, ce qui signifie que le système agrivoltaïque permet d'économiser du terrain en ayant un meilleur rendement agricole et énergétique (Amaducci *et al.*, 2018). Par exemple, la demande en énergie des États-Unis pourrait être compensée à 100% avec seulement 11% des terres agricoles si elles étaient converties en systèmes agrivoltaïques (Hernandez *et al.* 2014). L'exploitation agrivoltaïque permettrait donc d'optimiser les paysages et pourrait ainsi aider à réduire la déprise agricole et l'abandon des pratiques pastorales tout en assurant un revenu aux agriculteurs (Weselek *et al.*, 2019).

En fonction de l'activité agricole jumelée, les panneaux sont configurés différemment soit en étant au sol pour des activités pastorales soit en hauteur en situation de mécanisation sur les cultures. De plus, la densité des panneaux peut varier en fonction de l'espace entre les rangées. Elle doit permettre au rayonnement d'atteindre la culture ou la prairie car la lumière est une ressource limitante pour la croissance végétale (Marrou *et al.*, 2013 ; Dupraz *et al.*, 2011).

Ce changement d'utilisation des terres et de pratiques avec l'exploitation photovoltaïque sur prairie pourrait améliorer l'habitat naturel grâce à un aménagement favorable et une gestion extensive (réduction des perturbations comme l'intensification, la mécanisation, les intrants chimiques) (CREXECO, 2019). En effet, compte tenu du temps d'exploitation d'environ 25 ans, la terre aurait le temps de se reposer, ce qui pourrait améliorer la santé des sols agricoles et donc la durabilité agricole à long terme (BRE, 2013 in Beatty *et al.*, 2017). Cependant, les champs solaires peuvent aussi empiéter sur les milieux naturels et leur installation peut être contradictoire avec la conservation de la biodiversité et le développement durable (CREXECO, 2019). Ils peuvent perturber les services écosystémiques rendus par un habitat naturel tels que la fonction de soutien, de régulation, d'approvisionnement et culturels fournis par le paysage (Millenium Ecosystem Assessment, 2005 in Armstrong *et al.*, 2014). Bien que les parcs solaires puissent avoir des effets positifs sur la diversité et l'abondance spécifique de certaines espèces d'oiseaux ainsi que sur l'abondance des bourdons et papillons (Montag *et al.*, 2016), les infrastructures provoquent un effet barrière et une fragmentation du paysage en perturbant les mouvements et donc les flux de gènes entre populations (Hernandez *et al.*, 2014).

Dans les systèmes agrivoltaïques avec prairies, les ovins sont souvent sollicités pour le pâturage aux vues de leur taille permettant de passer sous les panneaux. Avec le changement climatique

et les canicules plus fréquentes, les panneaux solaires sur prairies pâturées pourraient servir de structures permettant de fournir de l'ombre aux animaux. Il a été prouvé chez les moutons, en avril au Brésil, que le rayonnement intense était un facteur de stress car quand le rayonnement passe de 250 à 850 W.m<sup>-2</sup>, le bétail augmente de 13% à 69,3 % le temps qu'il passe sous les panneaux pour se réfugier en s'allongeant 38% de ce temps, preuve de confort thermique (Gebremedhin *et al.*, 2011 in Maia *et al.*, 2020).

En plus du confort pour les ovins générés par les effets micro-climatiques de la structure (effet thermique), ces conditions peuvent provoquer des modifications sur la biodiversité et la croissance par le manque de lumière sous les panneaux, d'autres effets sur la vitesse du vent, les échanges de gaz et de vapeur d'eau ainsi que sur la distribution des précipitations dans le parc solaire (Armstrong *et al.*, 2014 ; Hernandez *et al.*, 2014).

Pour pallier au problème de l'ombrage, les densités réduites de panneaux solaires permettent de laisser passer plus de lumière pour la végétation. D'après l'expérience de Dupraz *et al.* (2011) avec des panneaux en hauteur, le rayonnement moyen annuel dans un système ayant une densité normale sans système agricole atteint 44,9% du rayonnement incident en plein soleil alors qu'une densité réduite de moitié atteint 72% du rayonnement incident en plein soleil. De plus, l'hétérogénéité du rayonnement au sol est accentuée lorsque les panneaux sont proches du sol (Dupraz *et al.*, 2011). En système prairial avec des panneaux au sol, le PAR (rayonnement photosynthétiquement actif) quant à lui est réduit de 92% sous les panneaux par rapport à la zone contrôle sans panneaux (Armstrong *et al.*, 2016). La température du sol étant corrélée au rayonnement solaire, il a été démontré que quelle que soit la saison, la température du sol est plus fraîche sous les panneaux de 2°C à 5 cm de profondeur pour une culture de blé (Marrou *et al.*, 2013). La température du sol inférieure sous les panneaux a été aussi observée quelle que soit la saison, pour une prairie avec une différence sous les panneaux de 3,5 à 7,6°C (Armstrong *et al.*, 2016). La structure des panneaux présente un effet parasol mais aussi parapluie, cependant, des interstices séparent chaque module constituant un panneau. Armstrong *et al.* (2016) ont ainsi mesuré une précipitation localisée trois fois plus importante sous les panneaux à cause d'un ruissellement de l'eau sur les cadres de supports, tandis qu'Adeh *et al.* (2018) ont trouvé un sol prairial plus humide et plus longtemps sous les panneaux, comparé à la zone en plein soleil qui accentue l'évaporation.

Outre les effets sur le microclimat, les panneaux solaires ont aussi des impacts sur les prairies et cultures présentes dessous puisque la lumière est indispensable à la croissance des plantes (Dau-benmire, 1974 in Arsenault, 2010) et que l'ombre est l'un des trois principaux stress environnementaux non édaphiques (Stier, 2006 in Arsenault, 2010). L'ombre engendre ainsi des modifications

morphologiques et physiologiques sur les plantes sous les panneaux solaires, comparé à une situation de pleine lumière. Elle permet à contrario de limiter les effets négatifs associés aux forts rayonnements tel que l'évapotranspiration puisque l'ombre créée permet de réduire la température des feuilles et du sol et ainsi réduire la demande climatique directement liée à la quantité de rayonnement incident (Valle *et al.*, 2017a ; Adeh *et al.*, 2018). Une acclimatation des plantes à l'ombre peut compenser la limitation en lumière par les panneaux en formant des feuilles plus fines et allongées pour optimiser l'interception du rayonnement (Marrou *et al.*, 2013 ; Valle *et al.*, 2017a). De plus, grâce à la plasticité physiologique, les plantes adaptées à l'ombre atteignent des taux de photosynthèse maximaux à des niveaux de PAR réduits (Lambers *et al.*, 2008 in Armstrong *et al.*, 2016). Il a aussi été constaté sur des plantes maraichères que le taux de croissance est réduit sous les panneaux au stade juvénile (pour le concombre et la laitue) ce qui est sûrement dû à la température plus basse dans le sol et des méristèmes sensibles au froid proches du sol (Marrou *et al.*, 2013). Le PAR réduit par les panneaux peut aussi avoir des impacts positifs surtout dans les endroits avec un rayonnement excessif comme en Afrique subsaharienne où la productivité en est accrue grâce à la réduction du stress lumineux, de la photo-inhibition et du photo-dommage (Murata *et al.*, 2007 in Armstrong *et al.*, 2014). Cependant, il est constaté que la matière sèche est 1,17 fois plus faible sous les panneaux que dans la zone contrôle pour des plantes maraichères. Elle est néanmoins 1,21 fois plus élevée sous les panneaux qu'entre les rangées. Ce qui montre que les plantes ont augmenté leur efficacité d'interception du rayonnement (Valle *et al.*, 2017b). La biomasse diminuerait pour les plantes maraichères sous les panneaux solaires comparée au plein soleil dû à la diminution du rayonnement solaire (Valle *et al.*, 2017a). De même en prairie, Armstrong *et al.* (2016) ont remarqué une biomasse quatre fois plus faible sous les panneaux qu'en inter-rangée ou en zone contrôle avec une photosynthèse plus basse surtout au printemps et hiver. Pourtant, une autre étude menée en prairie par Adeh *et al.* (2018) a mis en évidence une biomasse supérieure de 90% sous les panneaux solaires comparé à la zone contrôle et de +126% comparé à l'inter-rangée. Arsenault (2010) a aussi remarqué une végétation plus haute et luxuriante à l'ombre des panneaux.

Les effets des panneaux solaires sur la biomasse prairiale reste donc très variable selon les études, cependant, des effets sur la diversité végétale ont été remarqués. Armstrong *et al.* (2016) ont observé une diversité végétale prairiale deux fois plus faible sous les panneaux solaires avec une majorité de poaceae excluant compétitivement les autres plantes, comparativement à une majorité de plantes diverses et de légumineuses en contrôle et inter-rangée. Montag *et al.* (2016) ont aussi constaté une plus grande diversité en inter-rangée que sous les panneaux. Ainsi, il est probable



qu'au long terme des exploitations solaires (20 à 25 ans), il peut y avoir un changement de composition des communautés végétales sous les panneaux ([Euskirchen et al., 2009](#) in [Armstrong et al., 2014](#) ; [Montag et al., 2016](#)).

Les études sur les effets de l'agrivoltaïsme sur la végétation prairiale en sont qu'à leur début, la quantité de références bibliographiques reste faible. C'est pourquoi un projet s'est mis en place entre deux PME de centrale solaire (JPEE et PhotoSol) et l'Unité de recherche UREP du centre INRAE de Clermont Ferrand, et dans lequel ce rapport de stage s'intègre. Un parc situé en moyenne montagne et un parc situé en plaine tous les deux pâturés par des ovins et couverts par des panneaux solaires au sol ont été sélectionnés.

Les expériences mises en place de début juin à fin août ont pour objectifs de suivre les effets de la présence des panneaux solaires sur la dynamique prairiale en comparant différentes variables sur les plantes et le microclimat par rapport à des conditions sans ombrage et avec un ombrage partiel. Afin de séparer les effets directs des panneaux solaires sans l'influence du pâturage ovin, des suivis ont été réalisés en exclos (petite échelle sur des transects) et comparé à des suivis en situation de pâturage (large échelle).

Les hypothèses liées aux connaissances actuelles sont : - i) une diversité végétale différente ainsi qu'une richesse spécifique plus faible sous panneaux par rapport aux zones ensoleillées sur le site le plus ancien comparé au site installé récemment; - ii) une dynamique végétale sous panneaux moins perturbée par le microclimat estival par rapport à l'inter-rangée et à la zone contrôle ; - iii) les effets bénéfiques en période estivale ne compensent pas les effets négatifs de l'ombrage sur la croissance des plantes conduisant à une absence d'effet positif sur la production de biomasse ; - iv) la plasticité des plantes sous panneaux conduit à une augmentation de la qualité du fourrage.

## **II) Matériels et méthodes**

### **A) Sites**

Dans le cadre du projet, deux sites auvergnats de centrale solaire ont été sélectionnés. Le premier site est géré par la PME JPEE et se situe à Braize dans l'Allier (03). Le site photovoltaïque d'une superficie totale de 30,08 ha, divisé en deux parcs, est en exploitation depuis Octobre 2018 après avoir effectué un semis de ray-grass, trèfle et fétuque. Le projet, entouré de haies et bordé de cultures, a été implanté sur une friche dégradée de 3-4 ans d'âge. La friche est installée sur le terrain d'une ancienne pépinière datant des années 80 ayant installée des fondations de serres et

un réseau d'irrigation. L'étude d'impacts a mis en évidence des pollutions causées par l'activité de la pépinière telle qu'une pollution plastique, organique et chimique ([ADEV Environnement, 2015](#)). Le parc est un site de plaine à une altitude de 235 m possédant une roche mère sédimentaire (grès) et un substratum globalement argileux. Le sol acide, plutôt pauvre en éléments minéraux, se dessèche rapidement et présente de fortes perturbations liées aux travaux de remises en état et de fouilles archéologiques. Le climat est de type océanique altéré avec peu de jours de grand gel. Les précipitations sont de l'ordre de 773 mm/an avec un ensoleillement de 1811 h/an pour une température moyenne annuelle de 10,9°C.

Le deuxième site est géré par la PME PhotoSol et se situe à Marmanhac dans le Cantal (15). Le site photovoltaïque d'une superficie totale de 21,7 ha, divisé en plusieurs parcs, est en exploitation depuis Janvier 2014. Le projet, présentant des haies et proche d'un boisement et d'un ruisseau, s'est implanté sur une prairie majoritairement mésophile pouvant présenter des espèces de cortèges floristiques forestiers non humides et rudérales ([L'Artifex, 2010](#)). Le parc est un site de moyenne montagne à une altitude de 840 m possédant une roche mère volcanique (Pyroclastite, Gneiss, Micaschiste). Le sol caractérisé comme sol brun est propice au développement végétal, avec un pH de l'ordre de 4,9 à 5,5. Le climat a une influence atlantique et montagnarde. Les précipitations sont de l'ordre de 1180 mm/an avec un ensoleillement de 2100 h/an pour une température moyenne annuelle de 10,1 °C. L'utilisation d'herbicides et de fertilisants est faite localement et ponctuellement en faible quantité.

Les installations de panneaux photovoltaïques fixes ont nécessité une mise à nu du sol localement. Les infrastructures varient entre les deux sites. La hauteur moyenne du point le plus haut d'un panneau est de 3 m pour Braize et de 2,10 m pour Marmanhac. La largeur des rangées de panneaux est de 3,5 m pour Braize et 2,90 m pour Marmanhac en moyenne. La largeur de l'inter-rangée de 4 m en moyenne pour Braize et de 1,85 m pour Marmanhac dans notre zone d'étude. Les modules des panneaux solaires, orientés vers le Sud et inclinés à 25°, sont espacés en moyenne de 2 à 3 cm les uns des autres et les tables comportant les modules sont espacés de plusieurs dizaines de centimètres pour limiter la modification de la répartition des précipitations provoquée par les panneaux photovoltaïques.

## B) Zones d'études

Le site de Braize étant divisé en 2 parcs, nous avons installé nos expériences sur l'un des parcs avec une zone d'étude de 14,72 ha. Ce parc est entretenu par un pâturage ovin variant de 80 à 100 brebis. La charge animale est de 0,8 à 1 UGB/ha.

Le site de Marmanhac est aussi divisé en plusieurs parcs pâturés par des ovins. Nous avons installé nos expériences sur un parc ayant une zone d'étude de 12,89 ha et présentant un pâturage par 150 brebis à l'année et 50 agneaux d'avril à juin. La charge animale est de 1,7 UGB/ha.

## 1. Zones en exclos

Pour étudier de manière séparée l'impact du pâturage ovin et les effets directs de la présence des panneaux solaires sur la végétation, nous avons réalisé des expériences en exclos ayant un périmètre d'environ 150 m. La position dans le parc a été raisonnée par la proximité d'un poste de contrôle pour alimenter la centrale d'acquisition de données en électricité. Cette zone comprend trois traitements. Le traitement Contrôle (C) qui est suffisamment éloigné des panneaux solaires pour éviter l'ombrage de ces derniers sur la végétation ( $\approx 4$ m). Le traitement Panneaux (P) qui est localisé sous les panneaux solaires et délimité par le point le plus haut d'un panneau au point le plus bas du même panneau. Le traitement Inter-rangée (I) qui est défini entre deux rangées de panneaux solaires.

### 1.1 Capteurs fixes

L'installation de sondes et capteurs sur le site de Braize a été réalisée le 10/06/20 et le 23/06/20 sur le site de Marmanhac. Les mesures issues des sondes et des capteurs sont moyennées et rendues par intervalle de 30 min, puis sont moyennées à l'échelle journalière.

#### 1.1.1. Station météo

Une station météo à dix paramètres (ClimaVUE50, Campbell®) a été installée dans la zone contrôle sur chaque site à une hauteur de 1,6 m sur Braize et 1,8 m sur Marmanhac. Seules les variables de Température de l'air (°C) et de précipitation (mm) ont été analysées dans ce rapport.

#### 1.1.2. Sondes d'humidité et de température du sol

Pour mesurer les différences microclimatiques induites par la présence des panneaux, trois transects ont été installés par traitement et disposés perpendiculairement au sein des rangées de panneaux et des inter-rangées (Figure 1). Un seul transect a été positionné par rangée avec le traitement Inter-rangée positionné dans le même alignement que le traitement P pour prendre en compte le potentiel effet d'hétérogénéité spatiale entre les différentes rangées de panneaux. Les transects pour P et I ont été positionnés suffisamment loin des bordures de rangées pour limiter le potentiel effet bordure avec la lumière qui pourrait passer par les côtés sous les panneaux. L'emplacement des transects est choisi en fonction de l'état de perturbations du sol pour éviter de se positionner sur du sol nu et rocailleux, moins représentatif de la zone d'étude.

Au sein de chaque transect, trois sondes d'humidités et de températures du sol (SMT100, STEP System GmbH) ont été installées de façon régulières et proportionnelles à la largeur des rangées de panneaux ou inter-rangées pour mesurer au mieux sur l'ensemble de la largeur les caractéristiques des traitements (Tableau 1, Figure 1). Neuf sondes disposées entre trois transects sont ainsi installées par traitement et par site. La distance entre deux sondes du traitement Contrôle est déterminé par la moyenne des distances entre sonde en traitement P et I. Les sondes sont installées à 20 cm de profondeur correspondant à une densité de racines suffisante et représentative des espèces prairiales (Zwicke *et al.*, 2015).

Tableau 1: Distance entre les sondes par traitement en fonction des sites.

Site	Braize	Marmanhac
Traitement	Distance entre les sondes (cm)	
Contrôle	92,4	59,25
Inter-rangée	100	46,25
Sous panneaux	87,5	72,5

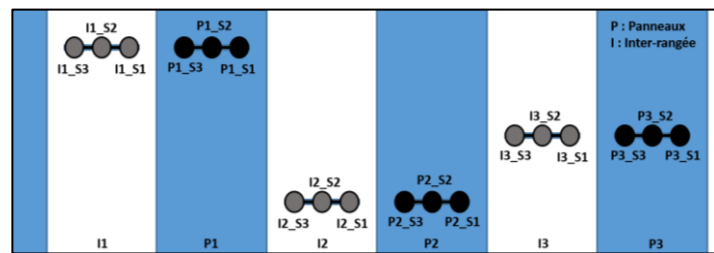


Figure 1 : Schéma de la disposition des sondes au sein des transects en Panneaux (bleu) et Inter-rangée (blanc). Trois rangs de panneaux et d'inter-rangées sont montrés.

### 1.1.3. Capteurs de rayonnement

Pour mesurer la différence de rayonnement due à la présence des panneaux, deux capteurs de rayonnement mesurant simultanément le rayonnement global et le rayonnement diffus (BF5, Delta T Devices) ont été installés dans les traitements P et C pour les mesurer en zone ombragée par les panneaux et en pleine lumière sans influence des panneaux. Les capteurs ont été positionnés au milieu de la largeur de la rangée de panneaux solaires à 1,20 m sur Braize et à 0,70 m sur Marmanhac. En C, ils ont été placés suffisamment loin des panneaux à 1,20 m sur Braize et 1 m sur Marmanhac. Les deux capteurs sont déplacés d'un site à l'autre tous les quinze jours.

### 1.2. Suivi de la végétation

Un relevé floristique a été effectué sur chaque quadrat (0,5 x 0,5 m) en utilisant le pourcentage de recouvrement pour déterminer la richesse et l'abondance spécifique au début de l'expérience : sur Braize le 27/05/20 et sur Marmanhac le 02/06/20.

Pour suivre l'évolution de la végétation (croissance, biomasse, NDVI) dans la zone d'exclos et connaître l'influence des panneaux solaires, et corrélér les données microclimatiques aux données sur la végétation, deux transects de trois quadrats fixes de 0,5 x 0,5 m de côté (0,25m<sup>2</sup>) ont été installés de chaque côté des transects de sondes. Une sonde SMT100 est donc entourée de deux quadrats de végétations. Il y a ainsi 18 quadrats disposés entre trois transects par traitement sur

chaque site.

La hauteur d'herbe a été mesurée à l'aide d'un herbomètre toutes les semaines, avec cinq points de mesure sur chaque quadrat (quatre dans les coins et un au centre).

De plus, sur ces mêmes quadrats, un indice de végétation (NDVI : Indice de végétation par différence normalisée) a été mesuré chaque semaine avec un appareil portatif (GreenSeeker, Trimble®) pour déterminer la dynamique de l'état de la végétation sur chaque quadrat. Le GreenSeeker est un capteur actif déduisant le NDVI en mesurant la lumière réfléchie par le couvert végétal pour la lumière rouge et infra-rouge. Le NDVI est corrélé à la teneur en chlorophylle du couvert végétal et au taux d'azote (Deshayes, 2018). L'indice varie de 0 à 1, des valeurs > 0,80 correspondent à une végétation très verte et dense ; des valeurs < 0,30 correspondent à une végétation desséchée ou morte ou à la présence de sol.

La végétation est coupée dans chaque quadrat chaque mois à 5 cm du sol pour simuler le broutage ovin. La végétation est collectée puis mise à l'étuve à 60°C pendant 48h pour peser en sec la biomasse produite après chaque coupe ( $\text{g m}^{-2}$ ). Les premiers prélèvements T0 ont été faits le 11/06/2020 sur Braize et le 24/06/20 sur Marmanhac.

Le pourcentage de sol nu et de végétation sèche a été relevé par le même expérimentateur chaque semaine et avant chaque coupe pour connaître la densité végétale verte et sèche dans chaque quadrat, susceptibles d'influencer les mesures de NDVI.

## 2. Etude dans le reste du site

Pour savoir si les résultats obtenus dans la zone en exclos sont représentatifs du parc en entier, des zones fixes ont été identifiées de manière stratifiée et aléatoire : 20 points (C) et 60 points sont mesurés pour I et P. Un relevé non exhaustif de la flore a été effectué dans les zones sélectionnées en reportant les espèces dominantes. Il a eu lieu le 20/05/20 et le 27/05/20 pour le site de Braize et le 02/06/20 pour Marmanhac.

Au niveau de la zone fixe identifiée par un piquet numéroté, les mesures sont prises dans un cercle de 34,5 cm de diamètre centré sur un piquet qui sera décalé chaque mois dans la même zone après une récolte de la matière végétale. Les points de mesures en I et P sont faits dans le même alignement.

Chaque semaine, des mesures de NDVI sont prises avec le GreenSeeker pour les 140 points par site ainsi que le pourcentage de sol nu et de végétation sèche. Des mesures de hauteur de végétation sont prises avec un herbomètre à plateau électronique relié à un smartphone (Grasshopper®, horizon). Le plateau compresse la végétation jusqu'à ce que la densité de la végétation arrête

le plateau, il en est donc rendu une hauteur de végétation compressée liée à la densité de cette dernière qui sera appelé « hauteur de densité ».

Chaque mois, la végétation est tondue à 5 cm du sol pour récolter et peser la biomasse de 20 points tirés au sort sans remise pour les mois suivants pour I et P et 10 points pour C.

### C) Traitements des données

Les données utilisées dans ce rapport vont du début de l'expérience jusqu'au 25/08/20 pour Marmanhac et au 26/08/20 pour Braize. L'étude a utilisé les données des capteurs et sondes sous forme de moyenne journalière. Un tri a été effectué pour enlever les données aberrantes et les doublons liés à l'installation des capteurs et sondes et aux déplacements des capteurs toutes les deux semaines. Uniquement les données de 9h à 19h ont été utilisées pour réaliser les moyennes journalières des capteurs de rayonnement. Les moyennes journalières de chaque sonde ont été moyennées par transect.

La croissance journalière des quadrats de la zone d'exclos a été calculée sur la base des hauteurs mesurées chaque semaine, comme la différence de hauteur moyenne des cinq points entre deux dates divisées par le nombre de jour ( $\text{cm jour}^{-1}$ ). Les valeurs négatives ont été normalisées à 0. La biomasse (g matière sèche) prélevée sur la zone d'exclos et sur les points fixes sur le parc a été divisée par unité de surface au sol ( $\text{g m}^{-2}$ ). Les données biologiques obtenues dans la zone d'exclos (NDVI, croissance, biomasse) ont été moyennées par localisation des sondes puis par transects ( $n = 3$  par traitement, par date et par site).

La moyenne des abondances spécifiques des relevés botaniques a été effectuée par transect pour extraire la richesse spécifique et l'indice de Simpson. Le pourcentage du nombre d'espèces faisant partie de la famille des Fabaceae et des Poaceae a aussi été extrait par transect. Le reste des espèces a été classé comme dicotylédone non fixatrice d'azote, appelée diverses par la suite. La liste d'espèce des points dans les parcs a été transformée en occurrence relative des espèces dominantes par traitement.

Les relevés botaniques de la zone d'exclos et la liste d'espèces par point du parc ont été transformés par traitement en tableau de présence absence pour obtenir l'indice de dissimilitude basée sur la distance de Jaccard afin de connaître la diversité bêta entre traitement ([Jaccard, 1901](#)).

### D) Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 4.0.2) avec un indice de confiance  $\alpha = 95\%$  et l'utilisation de l'erreur standard. Le package *vegan* sous R a été utilisé pour

obtenir l'indice de dissimilitude de Jaccard et l'indice de Simpson.

La comparaison des moyennes des transects sur la richesse spécifique, l'indice de Simpson, le pourcentage du nombre d'espèce par famille et le pourcentage de sol nu en fonction des traitements a été testée. Soit des tests de comparaisons de moyennes multiples anova suivi d'un post-hoc de Tukey ou soit de Kruskal-Wallis suivi d'un post-hoc de Dunn (package *dunn.test*) ont été réalisés. Les tests de Student ou de Mann-Whitney ont été utilisés pour comparer le rayonnement des traitements C et P. L'égalité des variances avec le test de Bartlett et la normalité des résidus avec le test de Shapiro ou avec un QQplot ont été vérifiés avant chaque test.

Des modèles mixtes ont été réalisés pour tester la dynamique temporelle du NDVI, croissance, biomasse. Une Anova à mesures répétées avec un facteur aléatoire Date et une hiérarchisation Transect|Quadrat ont été effectués en utilisant le package *lme4* pour chaque variable avec les données de la zone en exclos. L'homoscédasticité et la normalité des résidus ont été vérifiés avec la fonction *plotresid* du package *RVaidememoire*. Des tests post-hoc lsmeans du package *emmeans* ont été réalisés par la suite.

Le même test a été utilisé pour les variables mesurées à l'échelle du parc, le NDVI et la hauteur de densité. La variable biomasse des deux parcs ne présentant pas d'homoscédasticité des variances, des tests de comparaisons de moyennes non paramétriques de Kruskal-Wallis ont été effectués.

Pour analyser la dynamique microclimatique en fonction des différents traitements, des régressions linéaires ont été effectuées entre l'humidité du sol et les traitements, dates et les précipitations ainsi qu'entre la température du sol et les traitements, dates et la température atmosphérique. La variable Date a été utilisée sous forme de variable quantitative.

### III) Résultats

#### A) Végétation

##### 1. Diversité végétale

La richesse spécifique moyenne par transect sur le site de Braize est statistiquement identique entre traitements, comprise entre 15 (traitements contrôle : C et inter-rangée I) et 14 (traitement panneaux : P) ( $P > 0,05$ ,  $n = 3$ ). Sur le site de Marmanhac, le traitement Contrôle a une richesse spécifique deux fois plus importante que celle du traitement Panneaux ( $C = 15 \pm 1$  ;  $P = 7 \pm 1$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 3$ ). Le traitement Inter-rangée n'est pas statistiquement différent des autres traitements avec une richesse de  $12 \pm 1$ .

L'indice de Simpson moyen par transect n'est pas significativement différent entre traitement sur le site de Braize (Figure 2). L'indice étant supérieur à 0,70, on peut dire qu'il y a une diversité spécifique ayant une légère équitabilité d'abondance avec une petite dominance d'une espèce au sein des transects du site de Braize.

Sur le site de Marmanhac, il y a une différence significative

entre P et les autres traitements (Figure 2). Le P présente un indice

de Simpson faible ( $< 0,40$ ) ce qui correspond à une dominance d'une espèce sur les autres, contrairement à I et C où la dominance est plus légère ( $> 0,70$ ).

Sur le site de Braize et celui de Marmanhac, on peut voir que les indices de dissimilitude spécifique ont le même pattern entre la zone de transect et les points du parc (Tableau 2). Le traitement Panneaux de Braize est plus dissemblable du traitement Contrôle ( $> 0,50$ ) que du traitement Inter-rangée. Le traitement Inter-rangée de Braize présente des points communs avec les autres traitements sans être trop différent ou ressemblant ( $\approx 0,50$ ).

Tableau 2 : Diversité bêta (dissimilitude basée sur l'indice de Jaccard) entre les traitements au niveau des transects et du parc sur le site de Braize (Gauche) et Marmanhac (Droite) ; 1 = dissimilarité

Braize	Transect		Parc	
	C	I	C	I
I	0.50		0.46	
P	0.56	0.48	0.58	0.48

Marmanhac	Transect		Parc	
	C	I	C	I
I	0.39		0.29	
P	0.68	0.60	0.54	0.50

Sur le site de Marmanhac, P présente des dissimilitudes plus ou moins importantes avec les autres traitements, surtout dans la zone en exclos (transect ;  $\geq 0,50$ ). De plus, on remarque que les traitements C et I présentent une similarité spécifique ( $< 0,50$ ) (Tableau 2).

Sur le site de Braize, les transects du traitement C ont statistiquement un pourcentage d'espèces de Fabaceae ( $20,1\% \pm 0,8$ ) deux fois plus important que P ( $9,7\% \pm 2,9$ ) et I ( $8,7\% \pm 1,3$ ) ( $P < 0,01$ ,  $n = 3$ ). Le traitement C possède statistiquement 10 à 20% de moins de pourcentage d'espèces de Poaceae ( $22,1\% \pm 1,5$ ) que le traitement P ( $32,9\% \pm 2,8$ ) et I ( $40,2\% \pm 0,8$ ) ( $P < 0,005$ ,  $n = 3$ ). Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les traitements pour le pourcentage d'espèces diverses ( $C = 57,8 \pm 1,1$  ;  $I = 51,1 \pm 1,1$  ;  $P = 57,5 \pm 5,7$ ).

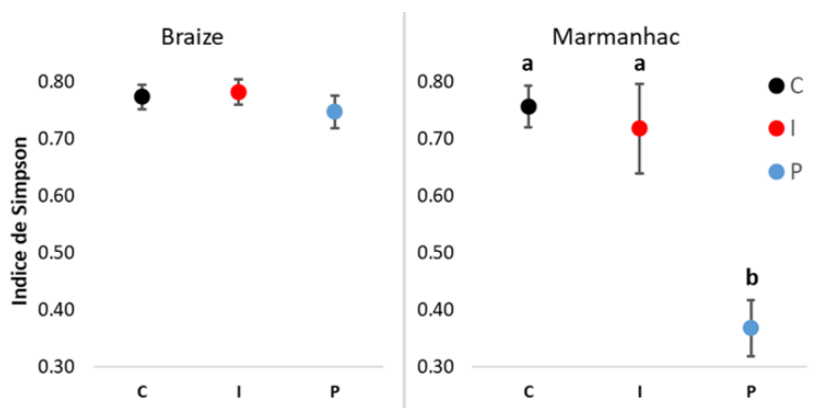


Figure 2 : Indice moyen de Simpson sur les transects par traitement. Gauche : Braize ( $P > 0,05$ ), Droite : Marmanhac ( $P < 0,01$ ) ; 1 = Maximum de diversité ; Moyenne +/- erreur standard,  $n = 3$ .



L'espèce la plus dominante dans les transects du traitement Panneaux est une poaceae, *Dactylis glomerata* L. avec 50,6% de recouvrement. Cette espèce est aussi la plus occurrente dans le parc pour le traitement P avec 61,7% d'occurrence relative. L'espèce la plus dominante dans les transects des traitement C et I est une poaceae, *Festuca ovina* L. avec respectivement 75,6% et 61,1% de recouvrement. Cette espèce est aussi la plus présente dans les points du parc en traitement I avec 63,3% d'occurrence relative. C'est *Bromus hordeaceus* L. qui présente la plus grande occurrence (60%) du parc du traitement Contrôle.

Sur le site de Marmanhac, il n'y a pas de différence significative du pourcentage des espèces de Fabaceae, de Poaceae ni des diverses au sein des transects entre traitements ( $P > 0,05$ ,  $n = 3$ ), avec respectivement, pour le Contrôle  $13,9 \pm 3,9 \%$ ,  $34 \pm 1,8 \%$  et  $52,1 \pm 5,5$  pour l'Inter-rangée  $10,9 \pm 1,8 \%$ ,  $31,6 \pm 5,4 \%$  et  $57,5 \pm 4,1$  et pour le Panneaux  $6,7 \pm 6,7 \%$ ,  $48,5 \pm 4,6 \%$  et  $44,8 \pm 2,9$ .

Sur le site de Marmanhac, l'espèce *Arrhenatherum elatius* (L.) P.Beauv. est la plus dominante sur les transects entre traitements ( $C = 63,3\%$ ,  $I = 45\%$ ,  $P = 81,7\%$ ) et présentant l'occurrence la plus grande pour les trois traitements des points du parc ( $C = 80\%$ ,  $I = 96,7\%$ ,  $P = 100\%$ ).

## 2. Variables biologiques

### 2.1. Croissance

L'interaction entre les facteurs Traitement et Date a un effet significatif sur la croissance pour les deux sites (Figure 3). Sur le site de Braize, pendant la durée de l'expérience, la croissance de P est de 0,28 cm/j, I est de 0,10 cm/j et C est de 0,09 cm/j. Le traitement P est significativement plus grand de 200% que I et C. On remarque que la croissance décélère significativement et progressivement avant la coupe mensuelle et se retrouve quasiment nulle pour les traitements C et I après la coupe de T1 le 16 Juillet. L'écart entre les maximums de croissance toute date confondue est de 0,24 cm par jour entre P et C et de 0,30 cm par jour entre P et I alors qu'elle est de 0,05 cm par jour entre I et C.

Sur Marmanhac, pendant la durée de l'expérience, la croissance de P est de 0,27cm/j, I est de 0,22cm/j et C est de 0,12cm/j. I et P sont significativement supérieurs à C de 80 et 125% respectivement. Cependant, date par date, il n'y a pas de différence significative entre les traitements dans 75% des cas (Figure 3). On remarque une accélération significative de la croissance dans le temps pour tous les traitements après chaque coupe, cette dernière provoque quasiment un arrêt de la croissance. La différence entre les maximums de croissance est de 0,09 cm par jour entre P et C, de

0,18 cm par jour entre I et P et de 0,27 cm par jour entre I et C.

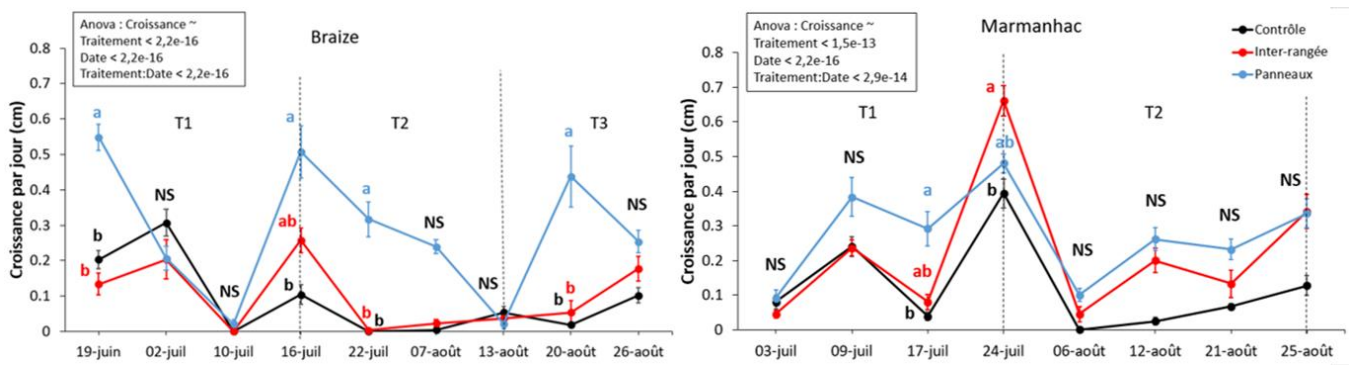


Figure 3 : Dynamique temporelle de la croissance mesurée sur les transects pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard,  $n = 3$ . Dans l'encadré figure les résultats de l'anova à mesures répétées.

## 2.2. Hauteur de densité

La hauteur de densité de la végétation, mesurée sur l'ensemble du parc, est affectée significativement par l'interaction entre les facteurs traitement et dates pour les deux sites (Figure 4). Sur le site de Braize, le traitement C a une densité de végétation significativement plus grande de 97% que le traitement P (31,6 mm contre 62,4 mm). Le traitement I est significativement identique à C au début et finit par diminuer pour ressembler statistiquement aussi à P. Les trois traitements ne sont plus significativement différents vers la fin de l'expérience. Le traitement I montre une différence entre la première et la dernière mesure en ayant une chute de 38% de la hauteur de densité (sur toute la durée,  $I = 43,9$  mm).

Sur Marmanhac, P a une moyenne, sur toute la durée de l'expérience, de 39 mm de hauteur de densité. C a une moyenne de 50,4 mm et I a une moyenne de 47,7 mm de hauteur de densité. Cependant, il n'y a pas de différence significative dans plus de 55% des cas et consécutivement à 3 reprises au début de l'expérience (Figure 4). Le reste du temps, le traitement P se différencie significativement du traitement C et I. Ces derniers sont respectivement plus grands de 29 et 22%. A la

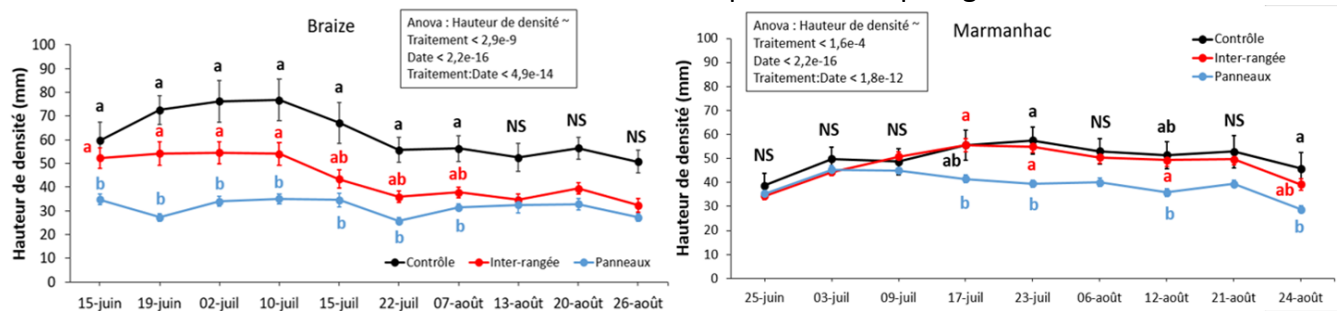


Figure 4 : Dynamique temporelle de la hauteur de densité (mm) pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard,  $n$  : P et I = 60 ; C = 20. Dans l'encadré figure les résultats de l'anova à mesures répétées.

dernière date, le traitement I se rapproche statistiquement de P. Au sein de chaque traitement, il n'y a pas de différence significative entre la première et la dernière mesure.

## 2.3. Indice NDVI

### 2.3.1. Transects

L'indice NDVI est affecté significativement par l'interaction entre les facteurs traitements et dates pour les deux sites (Figure 5). Sur le site de Braize, en moyenne sur l'expérience, P est significativement plus grand que I et C de respectivement 48 et 60% ( $P = 0,40$  ;  $I = 0,27$  ;  $C = 0,25$ ). Cependant, dans 70% des cas, il n'y a pas de différence significative entre les traitements. Entre la première coupe le 11 juin et la dernière le 13 août, il n'y a pas de différence significative au sein de chaque traitement.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur l'expérience, I est significativement plus grand que P et C de respectivement 20 et 40% ( $P = 0,56$  ;  $I = 0,67$  ;  $C = 0,48$ ), cependant, il n'y a pas de différence significative entre les traitements dans 30% des cas avant la coupe du 24 juillet (Figure 5). C se différencie significativement dans le temps de I puis de P après la coupe du 24 juillet. I et P sont 95% plus grand que C durant la période T2. Uniquement C a un indice qui baisse significativement de 50% entre la première coupe le 24 juin et la dernière le 25 août. On remarque une chute significative de la valeur NDVI après chaque coupe sur les deux sites.

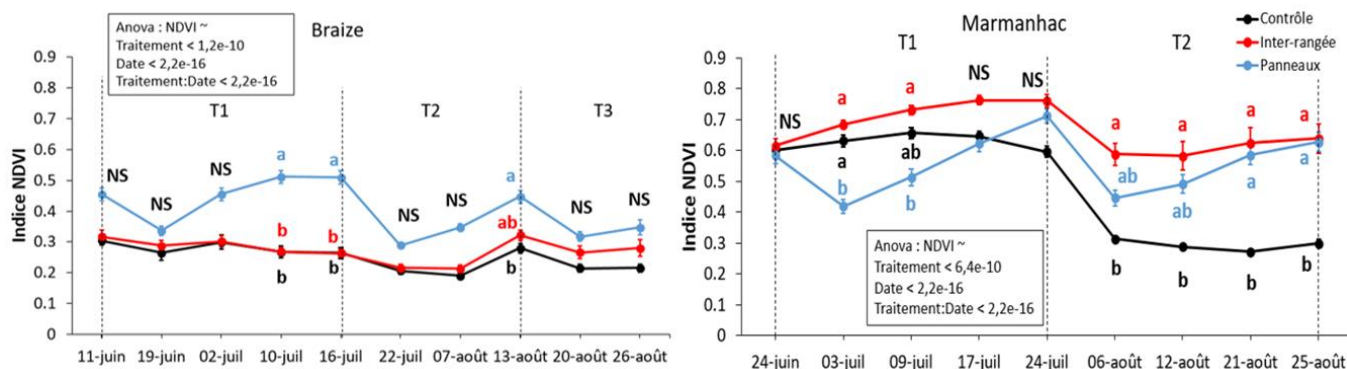


Figure 5 : Dynamique temporelle de l'indice NDVI mesuré sur les transects, pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) NS :  $P > 0.05$ . Moyenne +/- erreur standard,  $n=3$ . Dans l'encadré figure les résultats de l'anova à mesures répétées.

### 2.3.2. Echelle du parc

Pour les deux sites, l'indice NDVI mesuré au niveau du parc est affecté significativement par l'interaction entre les facteurs traitements et dates (Figure 6). Sur Braize, l'indice NDVI mesuré sur le traitement P est toujours significativement supérieur de 56% comparé aux deux autres traitements, sauf lors des deux premières dates puis le traitement C ressemble statistiquement à I. L'indice moyen sur la durée de l'expérience est de 0,32 pour C, 0,31 pour I et 0,49 pour P. Il y a une

baisse significative entre la première mesure et la dernière au sein de chaque traitement de 48% pour C, de 40% pour I et de 15% pour P.

Sur Marmanhac, en moyenne, P et I sont significativement plus grand de 13% que C ( $P = 0,54$  ;  $I = 0,60$  ;  $C = 0,54$ ). Cependant, dans près de 40% des cas, il n'y a pas de différence significative entre traitements et ce au début de l'expérience (Figure 6). Une différence statistique arrive au 3 juillet, le traitement P se différencie des deux autres traitements à partir du 6 août en étant supérieur de 29% car ces deux derniers diminuent. Il y a une baisse significative entre la première mesure et la dernière au sein de chaque traitement de 40% pour C, de 32% pour I et de 13% pour P.

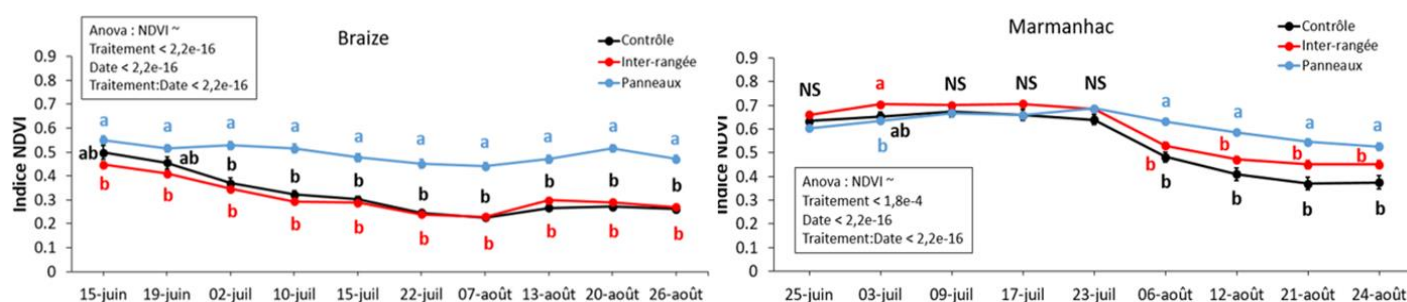


Figure 6 : Dynamique temporelle de l'indice NDVI mesuré sur l'ensemble du parc, pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard,  $n = 60$  pour P et I ;  $n = 20$  pour C. Dans l'encadré figure les résultats de l'anova à mesures répétées.

## 2.4. Biomasse

### 2.4.1. Transects

La biomasse est affectée significativement par l'interaction entre les facteurs traitements et dates pour les deux sites (Figure 7). Sur le site de Braize, en moyenne pendant l'expérience, P est significativement plus grand de 45% que I ( $P = 26,5 \text{ g/m}^2$ ,  $I = 18,3 \text{ g/m}^2$ ,  $C = 24 \text{ g/m}^2$ ), cependant, il n'y a aucune différence significative ponctuellement entre les traitements. La biomasse diminue significativement dans le temps pour les trois traitements en ayant une différence entre la première coupe et la dernière coupe de  $19,4 \text{ g/m}^2$  pour P, de  $27,5 \text{ g/m}^2$  pour I et de  $35,4 \text{ g/m}^2$  pour C.

Sur Marmanhac, les traitements ne présentent pas de différences significatives en ayant une moyenne sur toute l'expérience de  $42,1 \text{ g/m}^2$  pour P,  $32,5 \text{ g/m}^2$  pour I et  $32,6 \text{ g/m}^2$  (Figure 7). Il y a une différence significative avec P qui possède une biomasse plus importante qu'en I uniquement pour la première coupe mais pas pour les deux suivantes. Seul le traitement C montre une différence significative entre la première mesure et la dernière en ayant une perte de  $45,6 \text{ g/m}^2$ .

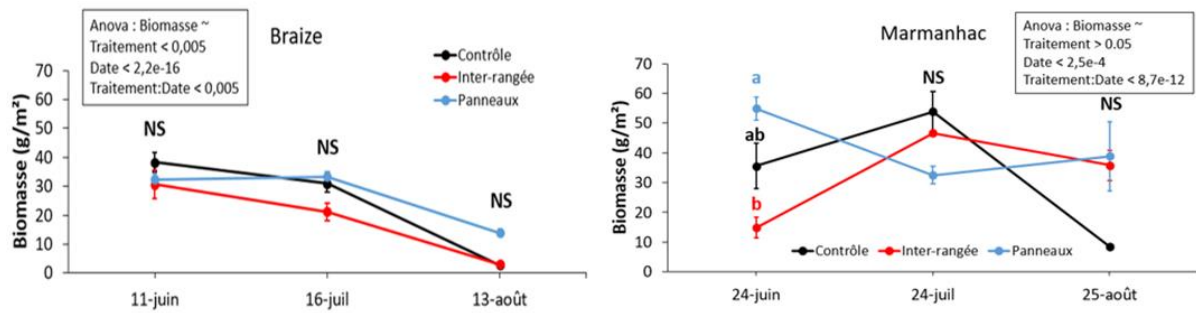


Figure 7 : Production de biomasse pour trois dates mesurées sur les transects pour le site de Braize à gauche et le site de Marmanhac à droite ; Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard,  $n = 3$ . Dans l'encadré figure les résultats de l'anova à mesures répétées.

#### 2.4.2. Echelle du parc

Le test de comparaison de moyenne sur Braize ne montre ni de différence significative entre les traitements aux différentes dates (Figure 8) ni sur la moyenne de l'expérience ( $C = 107,3 \pm 19,3$  g/m<sup>2</sup> ;  $I = 74,8 \pm 11$  g/m<sup>2</sup> ;  $P = 56,1 \pm 5$  g/m<sup>2</sup>). Sur le site de Marmanhac, le test montre une différence significative avec le traitement Panneaux qui possède une biomasse plus importante qu'en Inter-rangée lors de la première coupe mais pas pour les deux suivantes (Figure 8). Sur la moyenne de l'expérience, il n'y a pas de différence ( $C = 69,3 \pm 12$  g/m<sup>2</sup> ;  $I = 47,9 \pm 5,2$  g/m<sup>2</sup> ;  $P = 55,2 \pm 2,8$  g/m<sup>2</sup>).

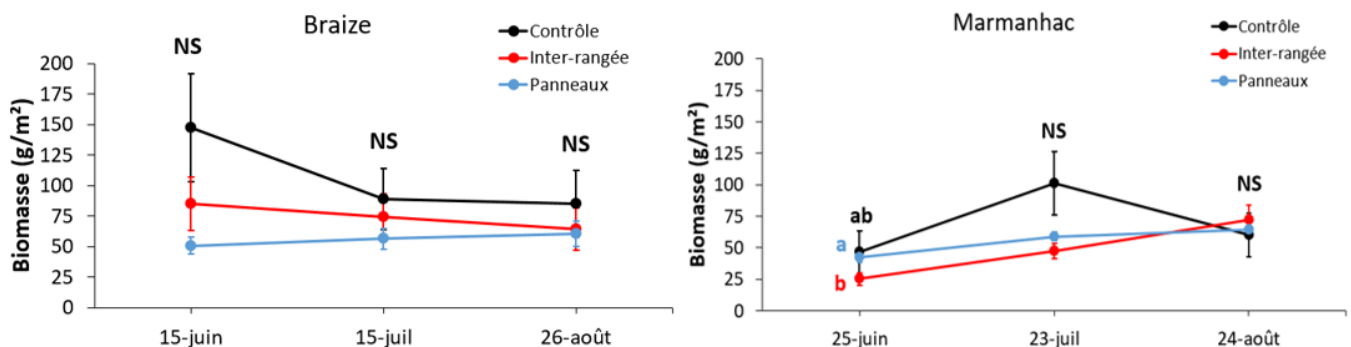


Figure 8 : Biomasse par traitement, mesurée dans le parc pour trois dates de coupes, sur Braize (à gauche) et sur Marmanhac (à droite). Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard,  $n = 20$  pour  $P$  et  $I$  ;  $n=10$  pour  $C$ .

## B) Variables abiotiques

### 1. Sol nu

#### 1.1. Transect

Sur le site de Braize, le % de sol nu pour le traitement Contrôle est significativement plus faible d'environ 10% par rapport aux deux autres traitements ( $P < 2,6e-3$ ,  $n = 90$  ;  $C = 37,36\% \pm 1,34$  ;  $I = 43,31\% \pm 1,45$  ;  $P = 44,11\% \pm 0,97$ ). Sur le site de Marmanhac, les traitements sont tous significativement différents ( $P < 2,2e-16$ ,  $n = 81$  ;  $C = 4,21\% \pm 0,21$  ;  $I = 1,60\% \pm 0,35$  ;  $P = 10,45\% \pm 0,71$ )

avec plus de sol nu sous le traitement P.

## 1.2. Echelle du parc

Au niveau du parc, sur le site de Braize, le traitement Inter-rangée est significativement plus élevé de presque 8% que les deux autres traitements ( $P < 5,5e-7$ ,  $n$  : C = 200, I et P = 600 ; C =  $19,56\% \pm 1,44$  ; I =  $28,04\% \pm 1,23$  ; P =  $20,71\% \pm 0,85$ ). Sur le site de Marmanhac, il n'y a pas de différence significative entre les traitements ( $P > 0,05$ ,  $n$  : C = 180, I et P = 540 ; C =  $3,24\% \pm 0,28$  ; I =  $4,18\% \pm 0,38$  ; P =  $3,83\% \pm 0,33$ ).

## 2. Température du sol

Pour les deux sites, la température du sol augmente significativement avec la température de l'air et dans le temps (Figure 9).

Sur Braize, les traitements sont tous statistiquement différents entre eux (Figure 9). En moyenne sur la durée de l'expérience, la température du sol dans le traitement P est plus faible de  $5,5^{\circ}\text{C}$  par rapport au traitement C, et de  $4^{\circ}\text{C}$  que le traitement I, tandis que I a une température du sol plus faible de  $2^{\circ}$  par rapport C.

Il en est de même pour le site de Marmanhac (Figure 9). La température du sol du traitement P est de  $4^{\circ}\text{C}$  plus faible que C, et de  $2^{\circ}\text{C}$  plus faible que I, tandis que I a une température inférieure de  $2^{\circ}$  par rapport à C.

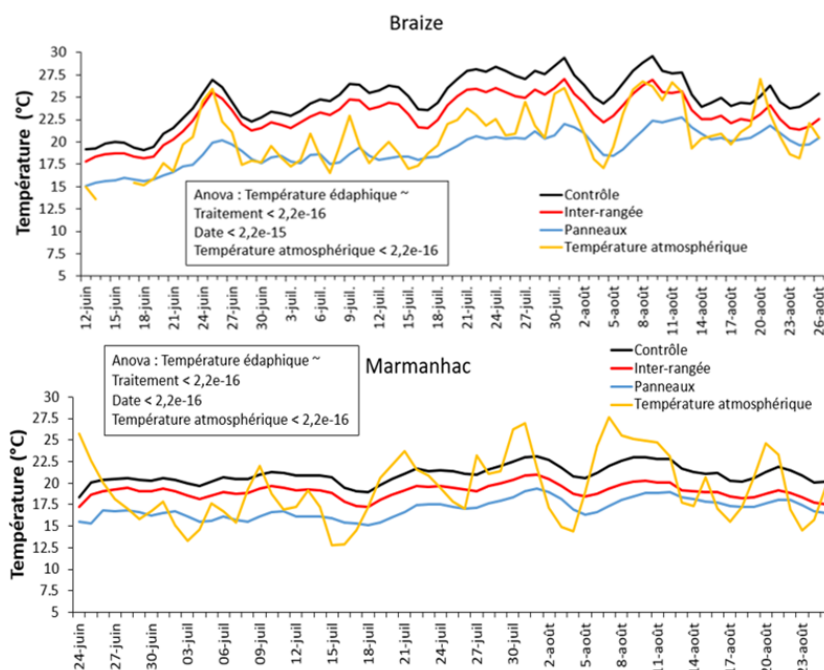


Figure 9 : Dynamique temporelle de la température du sol en fonction des traitements et température de l'air pour le site de Braize (au-dessus) et le site de Marmanhac (en dessous). Braize : Statistique de Fisher : 907,3 sur 4 et 652 DF,  $p$ -value :  $< 2,2e-16$ ,  $R^2$  ajusté : 0,85 ; Marmanhac : Statistique de Fisher : 577,8 sur 4 et 562 DF,  $p$ -value :  $< 2,2e-16$ ,  $R^2$  ajusté : 0,80 ;  $n = 3$ . Dans l'encadré figure les résultats de l'anova.

## 3. Humidité du sol

Pour les deux sites, l'humidité du sol augmente significativement avec les précipitations et diminue dans le temps (Figure 10).

Pour le site de Braize, les traitements sont tous statistiquement différents entre eux (Figure 10). Les moyennes sur toute la période de mesure sont de 7,47% d'humidité pour C, 6,36% pour I et



8,28% pour P. En moyenne sur la durée de l'expérience, P est 30% plus humide que I, P est 11% plus humide que C et C est 17% plus humide que I.

Il en est de même pour le site de Marmanhac (Figure 10). Les moyennes sur toute la période de mesure sont de 22,2 % d'humidité pour C, 27,7% pour I et 29,9% pour P. En moyenne sur la durée de l'expérience, P est 35% plus humide que C, P est 8% plus humide que I et I est 25% plus humide que C.

#### 4. Rayonnement

Les tests de comparaisons de moyennes ont montré que le rayonnement total dans

le traitement P est réduit de 92% en P par rapport à C sur Braize ( $P < 2,2e-16$ ,  $C = 974,82 \pm 54,54 \text{ umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ;  $P = 73,07 \pm 2,58 \text{ umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ;  $n = 35$ ) et de 94% en P par rapport à C sur Marmanhac ( $P < 2,2e-16$ ,  $C = 1238,79 \pm 39,03 \text{ umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ;  $P = 71,10 \pm 2,37 \text{ umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ;  $n = 36$ ).

## IV) Discussion

### A) Diversité végétale

Aucune différence notable de la richesse spécifique a été mise en évidence, sur le site le plus récent (Braize), ni même sur le cortège floristique qui n'est pas strictement différent entre les traitements comme l'a observé [Arsenault \(2010\)](#). Cependant, sur le site de Marmanhac, installé en système agrivoltaïque depuis 6 ans, une diminution de moitié de la richesse spécifique ainsi qu'un changement du cortège floristique sont observés sous panneaux comparés aux zones ensoleillées. Cette même différence liée à la présence des panneaux solaires a déjà été observée ([Armstrong et al. 2016](#) ; [Montag et al., 2016](#) ; [Adeh et al., 2018](#)). La réponse est similaire à celle observée lors d'une succession secondaire induisant de l'ombrage lorsque des arbres s'installent en prairies ([Pykälä et](#)

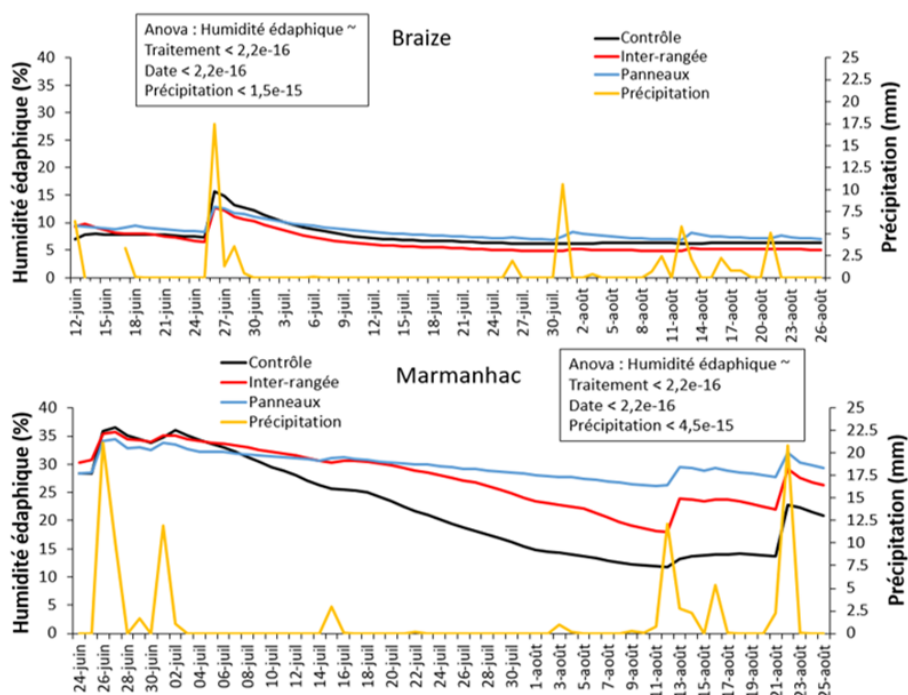


Figure 10 : Dynamique temporelle de l'humidité du sol en fonction des traitements et précipitations pour le site de Braize (au-dessus) et le site de Marmanhac (en dessous). Braize : Statistique de Fisher : 161 sur 4 et 652 DF,  $p$ -value :  $< 2,2e-16$ ,  $R^2$  ajusté : 0,49 ; Marmanhac : Statistique de Fisher : 193,7 sur 4 et 562 DF,  $p$ -value :  $< 2,2e-16$ ,  $R^2$  ajusté : 0,58 ;  $n=3$ . Dans l'encadré figure les résultats de l'anova.

[al., 2005](#)). Effectivement, un filtre physiologique est provoqué par l'ombrage des panneaux induisant un manque de lumière pour les espèces sténoèces aux milieux lumineux ([Schulze et al., 2019](#)). Cela peut être constaté avec le nombre d'espèces de la famille des Fabacées qui est plus nombreux dans les zones ensoleillées ([Armstrong et al., 2016](#)). Cette famille, ayant une stratégie de tolérance au stress liés à leur trait d'histoire de vie ([Grime et al., 2017](#)), sont majoritairement exclusives aux environnements ensoleillés ([Flora Helvetica, 2012](#)). Contrairement aux Poacées plus ubiquistes qui sont nombreuses et présentent des abondances plus élevées dans tous les traitements.

Néanmoins, aucune dominance d'une espèce sur les autres a été déterminée sur le site de Braize. L'explication peut venir du fait que l'humidité du sol étant très faible, les trois traitements présentent des situations de stress hydrique intense en été, comparé au site de Marmanhac. D'après [Grime et al. \(2017\)](#), les situations de stress inhibent les comportements de compétitions et ainsi les exclusions compétitives des autres espèces. Alors que sur le site de Marmanhac, sous les panneaux, la dominance de l'espèce *Arrhenaterum elatius* a été mise en avant. Cette espèce est aussi la plus abondante et la plus occurrente dans tout le parc. Bien qu'elle ait une préférence pour les milieux lumineux d'après les indices de Landolt ([Flora Helvetica, 2012](#)), elle présente une valence écologique large lui permettant de s'adapter à plusieurs milieux grâce à une grande plasticité phénotypique. De plus, cette espèce euryèce possède une stratégie compétitive en l'absence de stress ([Grime et al., 2017](#)). Sur le site de Marmanhac, le traitement sous panneaux étant moins sujet aux périodes de stress hydrique ainsi qu'aux stress thermiques et de rayonnements intenses en été, l'espèce peut exprimer son caractère compétiteur. *A. elatius* se développe en provoquant un filtre biotique sous les panneaux grâce à sa croissance favorisée surtout en présence de fertilisation comme c'est le cas sur le site de Marmanhac et pourrait expliquer la diminution de la richesse spécifique ([Wattez & Dériré, 2005](#) ; [Grime et al., 2017](#)).

Sur le site de Braize, la dominance sous les panneaux par *Dactylis glomerata* pourrait être possible à long terme du fait de la capacité de cette espèce à exclure les autres espèces (exclusion compétitive) et du fait de sa grande tolérance aux sécheresses. De plus, elle pourrait exprimer une stratégie compétitive en l'absence de perturbations excessives liés au pâturage (piétinement, herbivorie) ([Grime et al., 2017](#)).

La diversité spécifique et les stratégies d'histoires de vie des différentes espèces variant selon les traitements peuvent influencer la dynamique globale des communautés notamment en termes de potentiel de croissance.



## B) Croissance

La croissance de la végétation est majoritairement plus grande sous les panneaux par rapport aux zones ensoleillées sur les deux sites suivis, ce qui confirme les résultats obtenus dans d'autres études (Arsenault, 2010 ; Adeh *et al.*, 2018). Cette différence peut être expliquée par la réserve en eau plus élevée dans le temps sous panneaux solaires. Cependant, la température du sol a aussi un impact sur la croissance de la végétation. Il est connu qu'un sol trop chaud a un impact négatif notamment sur le taux de croissance en provoquant des dommages à la plante (Schulze *et al.*, 2019). La température du sol élevée est corrélée à la température de l'air et notamment aux rayonnements solaires. Aux vues des 5,5°C de plus en zone contrôle et des 4°C de plus dans l'inter-rangées par rapport à sous les panneaux sur le site de Braize et respectivement 4°C et 2°C de plus sur le site de Marmanhac, le rayonnement et la température y sont plus intenses (Marrou *et al.*, 2013 ; Armstrong *et al.*, 2016). Ces intensités estivales provoquent des périodes de stress pour la végétation induisant une photo-inhibition (Schulze *et al.*, 2019).

Ces stress provoquent majoritairement sur le site de Braize un arrêt de la croissance pour les zones ensoleillées. Cet arrêt est de plus expliqué par leur stratégie et la sensibilité des espèces aux stress lumineux et hydriques. L'espèce *Festuca ovina* qui est dominante dans les zones ensoleillées présente une stratégie de tolérance aux stress ce qui implique une croissance lente (Grime *et al.*, 2017). Cependant, *Festuca ovina* n'est pas résistante aux brûlures liées aux photo-dommages et meurt lors de sécheresse ce qui explique le fait que la croissance soit arrêtée (Grime *et al.*, 2017). Contrairement à sous les panneaux où *D. glomerata* est protégé du stress lumineux grâce à la protection des panneaux. En l'absence de stress thermique et lumineux ne provoquant pas de photo-inhibition, il présente une stratégie compétitive ce qui implique une croissance rapide (Murata *et al.*, 2007 in Armstrong *et al.*, 2014 ; Grime *et al.*, 2017) néanmoins ralentis et stoppé quand la température est trop excessive et que la réserve en eau n'est plus suffisante.

Au contraire de la croissance qui ralentit au fur et à mesure du temps sur Braize après chaque coupe, la croissance sur Marmanhac montre l'effet inverse. La croissance augmente progressivement après chaque coupe et est rarement stoppée car les réserves en eaux dans le sol sont plus importantes, bien que la croissance en zone contrôle finit par ralentir ce qui pourrait être lié aux effets du stress lumineux et à la température qui augmentent. De plus, *A. elatius* est l'espèce la plus abondante sur les traitements de Marmanhac. Cette espèce présente majoritairement une stratégie compétitive avec comme trait d'histoire de vie une croissance rapide (Grime *et al.*, 2017). Le statut en eau n'étant pas limitant, les plantes possèdent une tolérance à la température plus forte et donc

une survie facilitée face aux photo-dommages (Schulze *et al.*, 2019). Le fait que le traitement inter-rangée de Marmanhac ait une croissance supérieure à celle de Braize peut provenir de la densité des rangées de panneaux qui sont plus proches sur Marmanhac ce qui augmente proportionnellement la surface en ombre sur ce traitement et donc diminue les stress (Marrou *et al.*, 2013).

Sur Braize, le potentiel de croissance en été sous panneaux est plus fort qu'en zones ensoleillées. Alors que sur Marmanhac, l'écart du maximum de croissance est plus grand entre l'inter-rangée et le contrôle ce qui signifie qu'en absence de stress, le potentiel de croissance est plus important en inter-rangée qui n'a pas de limitation en lumière contrairement aux panneaux et une protection partielle aux photo-dommages contrairement au contrôle. Cependant, ce potentiel de croissance n'a pas été observé sur l'ensemble du parc.

### C) Hauteur de densité

La végétation sous les panneaux présente la plus petite hauteur de densité sur les deux sites comparés aux zones ensoleillées. Cette différence peut s'expliquer par l'activité des moutons qui se couchent sous les panneaux ce qui contrebalance le potentiel de la végétation sous panneaux en l'absence des animaux. D'un côté, la hauteur est plus importante en zone contrôle car les points sélectionnés sont majoritairement positionnés sur la périphérie des sites, proches des clôtures où les moutons n'y circulent quasiment jamais. D'un autre côté, avec l'augmentation des températures et des rayonnements, les moutons se réfugient sous les panneaux solaires (Maia *et al.*, 2020). En se protégeant du rayonnement sous les panneaux, les moutons tassent et couchent la végétation ce qui fausse la mesure prise par le Grasshopper. On observe aussi une diminution de la hauteur en inter-rangée sur le site de Braize qui doit être due aux fautes que l'impact de l'herbivorie dépasse le potentiel de croissance qui est diminué par la sécheresse et le stress lumineux.

Le potentiel de croissance observé à petite échelle n'a pas de lien avec la hauteur observé à l'échelle du parc avec l'influence des moutons. Ces croissances variables en fonction des traitements peuvent être en lien avec l'état de la végétation.

### D) Indice NDVI

Sous les panneaux, l'indice NDVI est plus élevé à petite échelle spatiale comme à l'échelle du parc. L'indice NDVI étant liée à la teneur en chlorophylle des feuilles et indirectement à la photosynthèse, sous les panneaux, en été, la végétation est protégée de la déshydratation, des photo-dommages et de la photo-inhibitions induites par le stress lumineux contrairement aux zones ensoleillées. Ce stress est d'autant plus important si la réserve en eau n'est pas suffisante (Schulze *et al.*,

2019). Les stress lumineux et hydriques pendant les sécheresses conduisent à la dessiccation de la végétation (Schulze *et al.*, 2019). Ces stress provoquent donc une augmentation de la teneur en fibre, quand la température augmente, liée aux structures végétales restantes (Rueggsegger & Emmenegger, 2012). Cet état est visible avec des valeurs de NDVI faible de l'ordre de 0,30, comme ça peut être le cas pour les traitements contrôle et inter-rangée. Sous les panneaux, avec la réduction de 92 à 94%, en fonction des sites, des rayonnements globaux (Armstrong *et al.*, 2016 ; Adeh *et al.*, 2018), la demande climatique et l'évapotranspiration permettent de conserver le stock en eau plus longtemps et donc d'avoir une productivité photosynthétique plus pérennes.

L'adaptation des plantes à l'ombrage sous les panneaux a aussi un impact sur la valeur de NDVI. Les plantes en s'étiolant grâce à leur adaptation phénotypique à l'ombre possèdent proportionnellement une teneur en fibre réduite et un taux de chlorophylles par unité de surface supérieur pour augmenter l'efficacité d'interception des rayonnements (Lambers *et al* 2008 in Armstrong *et al.*, 2016 ; Deshayes, 2018 ; Schulze *et al.*, 2019). Ce taux de chlorophylles est lié à la teneur en azote dans la matière sèche qui est visualisable avec l'indice NDVI et qui est plus importante sous les panneaux comparés aux zones ensoleillées (Deshayes, 2018).

La différence de température sous les panneaux comparé aux zones ensoleillées peut retarder la maturation des plantes qui est induite par une augmentation de la température et du rayonnement (Schulze *et al.*, 2019). Les plantes sont ainsi moins rapidement matures sous les panneaux. Cette différence potentiel de phénologie impacte les valeurs de la qualité de la végétation (De On-darza, 2011). En effet, une végétation avant la floraison ou l'épiaison possède des taux de fibres plus faible et un taux d'azote supérieur comparativement à des plantes plus matures (Bélanger, 2013). Ces caractéristiques sont en accord avec la température du sol et l'indice NDVI plus faible en zone ensoleillée et plus grand sous les panneaux. Ce phénomène lié à la maturation explique la différence sur le site de Marmanhac de la dynamique de l'indice NDVI entre les deux échelles. A petite échelle, la végétation qui est coupée chaque mois reste au stade de développement végétatif et n'a pas le temps d'arriver à maturité comme à l'échelle du parc (Deshayes, 2018).

Cependant, après chaque coupe, la valeur de l'indice NDVI diminue, ce qui est induit par le pourcentage de sol nu qui redevient visible et aux taux de fibres qui est plus importants à la base des tiges (Bélanger, 2013).

La végétation sous les panneaux restant plus verte que les zones ensoleillées et devrait donc présenter une qualité fourragère supérieure en ayant un taux d'azote supérieur et une teneur en fibre diminuée grâce à la maturation retardée et à la réduction des stress.

La croissance différente ainsi qu'un état de la végétation variant en fonction des zones ombragées ou ensoleillées peuvent avoir des répercussions sur la biomasse produite.

## E) Biomasse

Que ce soit sur une petite échelle ou à l'échelle du parc sur les deux sites, les traitements n'ont pas eu d'influences sur la production de biomasse. Ces résultats sont en contradiction avec d'autres études. [Adeh et al. \(2018\)](#) ont trouvé une biomasse supérieure sous les panneaux et [Armstrong et al. \(2016\)](#) ont trouvé l'inverse une biomasse inférieure sous panneaux. Il est observé cependant sur Braize, une diminution globale de la biomasse dans le temps. Cette diminution est expliquée par la teneur en eau du site qui est faible et devient de plus en plus insuffisante pour la production de la biomasse puisque l'eau est la ressource la plus importante pour la production végétale ([Schulze et al., 2019](#)). Ce stress hydrique provoque une « trêve » estivale notamment plus marquée en zone contrôle qui a plus besoin d'eau pour produire de biomasse. Au contraire, à l'abris des panneaux solaires, la demande climatique est réduite car le rayonnement plus faible de 92-94% en fonction du site induit une diminution de l'évapotranspiration de plus de moitié d'après [Marrou et al. \(2013\)](#) ce qui permet de garder un stock en eau plus longtemps et d'avoir une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau pour la biomasse ([Valle et al., 2017a](#) ; [Adeh et al., 2018](#)).

Cette similarité de production de biomasse entre traitements alors que les croissances sont plus grandes sous panneaux peut provenir du fait que le pourcentage de sol nu est plus important sous les panneaux ce qui traduit une densité végétale plus faible ([Armstrong et al., 2016](#)). La différence provient aussi du fait que la teneur en fibres est plus faible sous les panneaux. Effectivement, les plantes sous les panneaux ont une plasticité phénotypique leur permettant de s'étioler pour la compétition par rapport à la lumière ([Marrou et al., 2013](#) ; [Grime et al., 2017](#) ; [Valle et al., 2017a](#)). Cette augmentation de la surface foliaire spécifique induit qu'il y a moins de matière sèche par unité de surface ce qui explique une biomasse similaire pour une croissance différente ([Schulze et al., 2019](#)).

De plus, le fait que les trois traitements ne présentent pas de différence statistique pourrait aussi provenir d'une hétérogénéité élevée au sein de chaque traitement générant des intervalles de confiances très larges. [Beatty et al. \(2017\)](#) ont, en effet, remarqué une dépression ou inhibition de la productivité au centre de la largeur sous les panneaux.

## V) Conclusion

A la suite des résultats, la diversité et la richesse végétale se sont trouvées homogènes sur le parc plus récent de Braize mais aurait tendance à s'appauvrir comme le suggère le site plus ancien de Marmanhac. Cet effet temporel est lié à la domination d'une espèce de la famille des poacées présentant une stratégie compétitive à l'abris des stress sous les panneaux et en appliquant un filtre biotique sur les autres espèces exclues compétitivement.

La dynamique de la croissance de la végétation s'est retrouvée moins perturbée, en été, sous les panneaux que dans les zones ensoleillées grâce à la réduction des stress hydriques, lumineux et thermiques induit par la protection du couvert des panneaux photovoltaïques. La végétation présente dans les zones de contrôle ou en inter-rangée, s'est vu affectée par la sécheresse provoquant une diminution de la croissance.

En plus du potentiel de croissance supérieure en l'absence de stress, la végétation sous panneaux possède un état végétatif tout au long de l'été. La végétation protégée de la dessiccation et présentant des adaptations phénotypiques à l'ombre s'est montrée d'une qualité fourragère supérieure. Comparativement à la végétation en plein soleil qui a mûri plus rapidement par rapport aux rayonnements et aux différences de températures plus élevées que sous les panneaux.

Cependant, bien que la croissance et l'état de la végétation sont avantagés sous les panneaux, la productivité à l'ombre n'a pas présenté une plus grande biomasse comparée à la végétation qui s'est développée au soleil. Les effets positifs liés aux panneaux comme l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'efficacité d'interception des rayonnements sont contrebalancés par les perturbations ovines, la surface foliaire spécifique et le pourcentage de sol nu diminuant la densité végétale.

L'absence de différences de biomasse entre les traitements aux vues des résultats bruts laisse à penser que l'hétérogénéité spatiale au sein d'un même traitement est grande. Il serait intéressant d'étudier à plus petite échelle intra-traitement pour connaître la dynamique spatiale sur la largeur sous les panneaux solaires et des inter-rangées. De plus, sur la dynamique végétale, les effets ne sont liés que temporellement à la période estivale. De surcroît, les effets liés à la diversité spécifique à long terme ont été visualisés en comparant deux sites de milieux différents et de cortèges floristiques différents. Il serait intéressant de poursuivre les expériences sur les mêmes sites pour enrichir les données obtenues en période estivale et à long terme sur cette dynamique. Spécialement dans un contexte de sécheresses et de canicules plus intenses et fréquentes, les systèmes agrivoltaïques permettraient de fournir du fourrage plus longtemps sous les panneaux. Cependant, la question concernant les performances agronomiques et animales de ces systèmes reste à étudier.

## Bibliographie

- Adeh E. H., Good S. P., Calaf M., Higgins C. W. (2019). Solar pV power potential is Greatest over croplands. *Scientific reports*, **9**(1), 1-6.
- Adeh E. H., Selker J. S., Higgins C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PloS One* **13**, e0203256.
- ADEV Environnement (2015). Projet d'implantation d'une centrale photovoltaïque au sol sur la commune de Braize, Département de l'Allier (03), Etude d'impact sur l'environnement. 193 p.
- Amaducci S., Yin X., Colauzzi M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy* **220**, 545–561.
- Armstrong A., Ostle N. J., Whitaker J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, **11**(7), 074016.
- Armstrong A., Waldron S., Whitaker J., Ostle, N. J. (2014). Wind farm and solar park effects on plant–soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global change biology*, **20**(6), 1699-1706.
- Arsenault J.T. (2010). Proposed Solar Panel Vegetation Impacts Stafford Landfill Solar Installation : Structure and Shading Impacts Prepared by Joseph Arsenault July 2010.
- Beatty B., Macknick J., McCall J., Braus G., Buckner D. (2017). Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report. 47 p
- Bélanger G. (2013). La gestion des coupes, colloque sur les plantes fourragères, Une alliée indispensable, CRAAQ, Résumés des conférences, 16-20.
- CREXECO (2019). Projet de recherche PHOTODIV. Etude du potentiel d'accueil de la biodiversité des centrales photovoltaïques au sol. 12 p.
- De Ondarza M. B. (2011). La digestibilité des fourrages, colloque sur les plantes fourragères, Maximiser nos plantes fourragères, Résumés des conférences, CRAAQ, 33.
- Deshayes G. (2018). Développement d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan. Mémoire de fin d'études d'ingénieurs, Agrocampus Ouest Rennes, 25 p.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, **36**(10), 2725-2732.
- Ecoinfos. Les chiffres essentiels du photovoltaïque 2020, [en ligne], <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/les-chiffres-essentiels-du-photovoltaique-au-30-juin-2018/> (page consultée le 5 mai 2020).
- EDF. Le solaire photovoltaïque en chiffres, [en ligne], <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-solaire-photovoltaique-en-chiffres> (page consultée le 5 mai 2020).

- Grime J. P., Hodgson J. G. Hodgson, Hunt R. (2007). Comparative plant ecology, a functional approach to common British species. 2nd edition, Castlepoint press. 748 p.
- Hernandez R.R., Easter S.B., Murphy-Mariscal M.L., Maestre F.T., Tavassoli M., Allen E.B., Barrows C.W., Belnap J., Ochoa-Hueso R., Ravi S., Allen M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **29**, 766-779.
- Jaccard P. (1901). Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* **37**, 547-579.
- L'Artiflex (2010). Création d'un parc photovoltaïque, Département du Cantal – Commune de Marmanhac, Tome 2, Dossier de demande d'autorisation préfectorale ; Etude d'impact. 223 p.
- Lauber K., Wagner G. (2012). Flora helvetica - Flore illustrée de la Suisse. 4<sup>ème</sup> édition, Haupt Bern. 1656 p.
- Maia A. S. C., de Andrade Culhari E., Fonsêca V. D. F. C., Milan H. F. M., Gebremedhin K. G. (2020). Photovoltaic panels as shading resources for livestock. *Journal of Cleaner Production*, **258**, 120551.
- Marrou H., Dufour L., & Wéry J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?. *European Journal of Agronomy*, **50**, 38-51.
- Marrou H., Guillioni L., Dufour L., Dupraz C., Wéry J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?. *Agricultural and Forest Meteorology*, **177**, 117-132.
- Marrou H., Wéry J., Dufour L., Dupraz C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, **44**, 54-66.
- Ministère de la Transition écologique. Solaire, [en ligne], <https://www.ecologie.gouv.fr/solaire> (page consultée le 5 mai 2020).
- Montag H., Parker G., Clarkson T. (2016). The effects of solar farms on local biodiversity: a comparative study. Clarkson & Woods and Wychwood Biodiversity.
- Pykälä J., Luoto M., Heikkinen R. K., Kontula, T. (2005). Plant species richness and persistence of rare plants in abandoned semi-natural grasslands in northern Europe. *Basic and applied ecology*, **6**(1), 25-33.
- Rügsegger H., Emmenegger J. (2012). Composants des parois cellulaires, *Revue UFA*, **7-8**, 70-71.
- Schulze E. D., Beck E., Buchmann N., Clemens S., Müller-Hohenstein K., Scherer-Lorenzen M. (2019). Plant Ecology (2nd Edition), Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature, 926 p.
- Valle B., Simonneau T., Boulord R., Sourd F., Frisson T., Ryckewaert M., Hamard P., Brichet N., Dauzat M., Christophe, A. (2017). PYM: a new, affordable, image-based method using a Raspberry Pi to phenotype plant leaf area in a wide diversity of environments. *Plant methods*, **13**(1), 98.

- Valle B., Simonneau T., Sourd F., Pechier P., Hamard P., Frisson T., Ryckewaert M., Christophe A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied energy*, **206**, 1495-1507.
- Wattez J. R., Désiré J. (2005). Essai de délimitation des territoires phytogéographiques dans le département de la Somme (France). *Lejeunia, Revue de Botanique*, 179 p.
- Weselek A., Ehmann A., Zikeli S., Lewandowski I., Schindele S., & Högy P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **39**(4), 35.
- Zwicke M, Picon-Cochard C, Morvan-Bertrand A, Prud'homme MP, Volaire F. (2015). What functional strategies drive drought survival and recovery of perennial species from upland grassland? *Annals of Botany*, **116**, 1001-1015.



## Annexe

Annexe 1 : Relevé botanique sur le site de Braize par traitement avec le pourcentage de recouvrement dans la zone en exclos ; - : absent des transects ; case grise et gras : présent dans les zones du parc ; Moyenne du recouvrement de 18 quadrats (0,5 x 0,5 m) par traitement

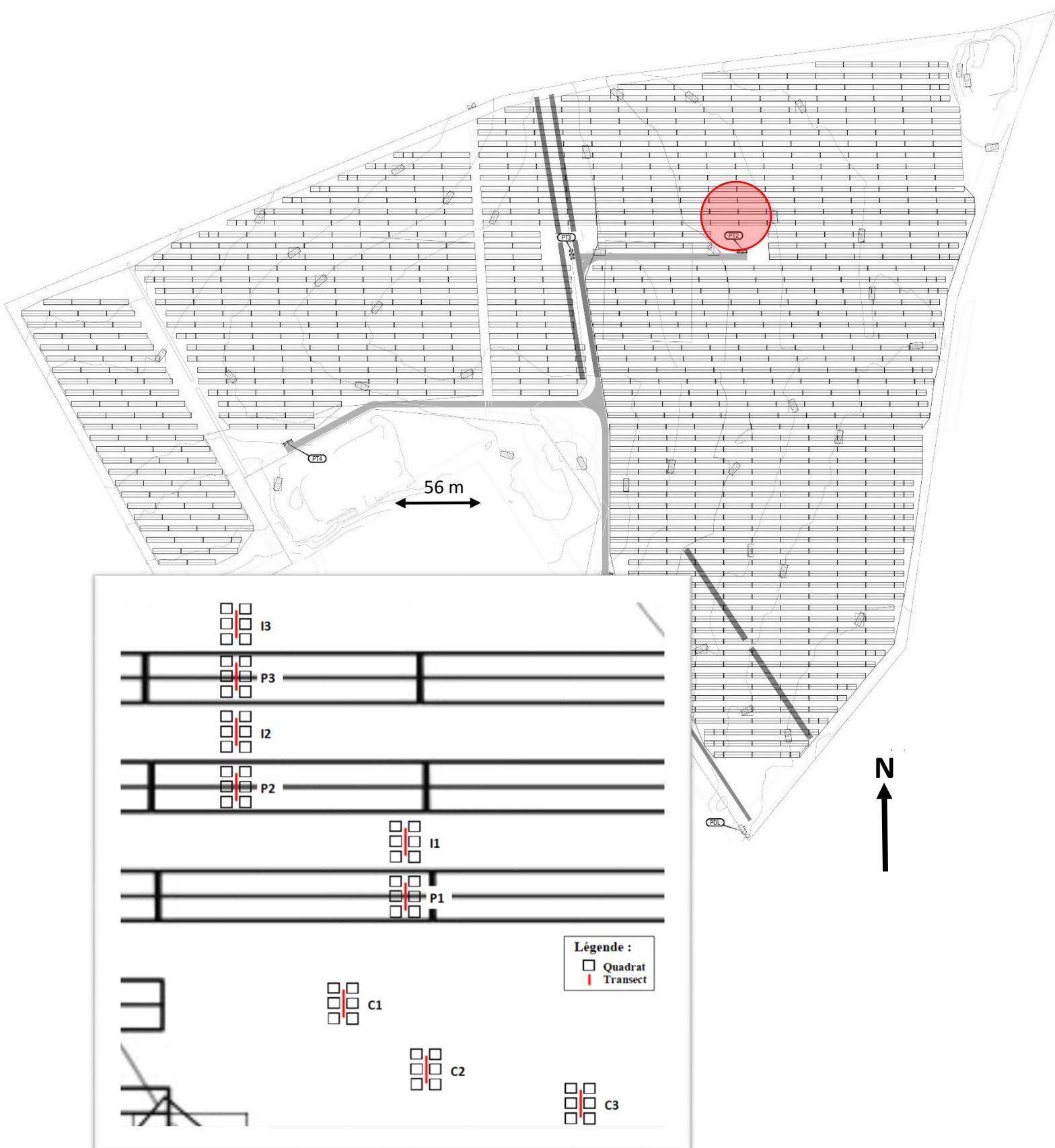
Espèce	Panneaux	Inter-rangée	Contrôle
<i>Achillea millefolium</i>	-	-	-
<i>Agrostis capillaris</i>	-	0.6	-
<i>Anagallis arvensis</i>	-	-	1.1
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	-	-	-
<i>Bromus hordeaceus</i>	<b>0.3</b>	<b>0.6</b>	<b>1.1</b>
<i>Bromus sterilis</i>	0.3	-	-
<i>Caardus sp.</i>	0.1	-	-
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	-	-	-
<i>Cerastium glomeratum</i>	0.4	<b>1.4</b>	<b>0.3</b>
<i>Cirsium arvense</i>	0.1	-	-
<i>Convolvulus arvensis</i>	<b>0.6</b>	-	<b>0.8</b>
<i>Crataegus monogyna</i>	-	-	1.1
<i>Cynosurus cristatus</i>	-	0.8	-
<i>Dactylis glomerata</i>	<b>50.6</b>	<b>15.0</b>	<b>9.4</b>
<i>Elytrigia repens</i>	-	-	-
<i>Epilobium sp.</i>	<b>0.1</b>	-	-
<i>Erigeron sumatrensis</i>	1.3	0.1	-
<i>Erodium cicutarium</i>	-	-	1.4
<i>Festuca arundinacea</i>	-	-	-
<i>Festuca ovina</i>	-	<b>61.1</b>	<b>75.6</b>
<i>Filago germanica</i>	0.3	3.9	<b>2.9</b>
<i>Gallium aparine</i>	-	-	-
<i>Geranium dissectum</i>	-	-	<b>0.3</b>
<i>Holcus lanatus</i>	-	-	-
<i>Hordeum murinum</i>	0.1	-	-
<i>Hypochoeris radicata</i>	<b>0.3</b>	<b>8.1</b>	<b>2.6</b>
<i>Lolium perenne</i>	<b>3.3</b>	<b>0.8</b>	<b>1.1</b>
<i>Medicago arabica</i>	-	-	-
<i>Medicago lupulina</i>	-	<b>0.1</b>	<b>1.4</b>
<i>Minuartia hybrida</i>	0.2	-	-
<i>Picris echioides</i>	<b>1.7</b>	<b>1.8</b>	<b>0.8</b>
<i>Picris hieracioides</i>	0.1	-	0.1
<i>Plantago lanceolata</i>	0.3	<b>1.9</b>	<b>8.6</b>

Espèce	Panneaux	Inter-rangée	Contrôle
<i>Poa pratensis</i>	-	-	-
<i>Poa trivialis</i>	3.1	1.4	-
<i>Polygonum aviculare</i>	0.1	-	-
<i>Potentilla reptans</i>	-	-	-
<i>Prunella sp.</i>	0.1	-	0.6
<i>Ranunculus acris</i>	-	-	-
<i>Rubus sp.</i>	<b>0.1</b>	-	-
<i>Rumex acetosella</i>	<b>0.1</b>	<b>6.1</b>	0.7
<i>Silene latifolia</i>	-	-	-
<i>Taraxacum officinale</i>	<b>3.9</b>	3.1	<b>1.1</b>
<i>Trifolium arvense</i>	0.1	0.1	<b>3.1</b>
<i>Trifolium repens</i>	<b>1.9</b>	<b>3.3</b>	<b>5.6</b>
<i>Urtica dioica</i>	-	-	-
<i>Verbena officinalis</i>	-	-	-
<i>Veronica arvensis</i>	0.3	0.4	-
<i>Viola arvensis</i>	-	-	0.3
<i>Vulpia bromoides</i>	<b>37.8</b>	<b>6.9</b>	-

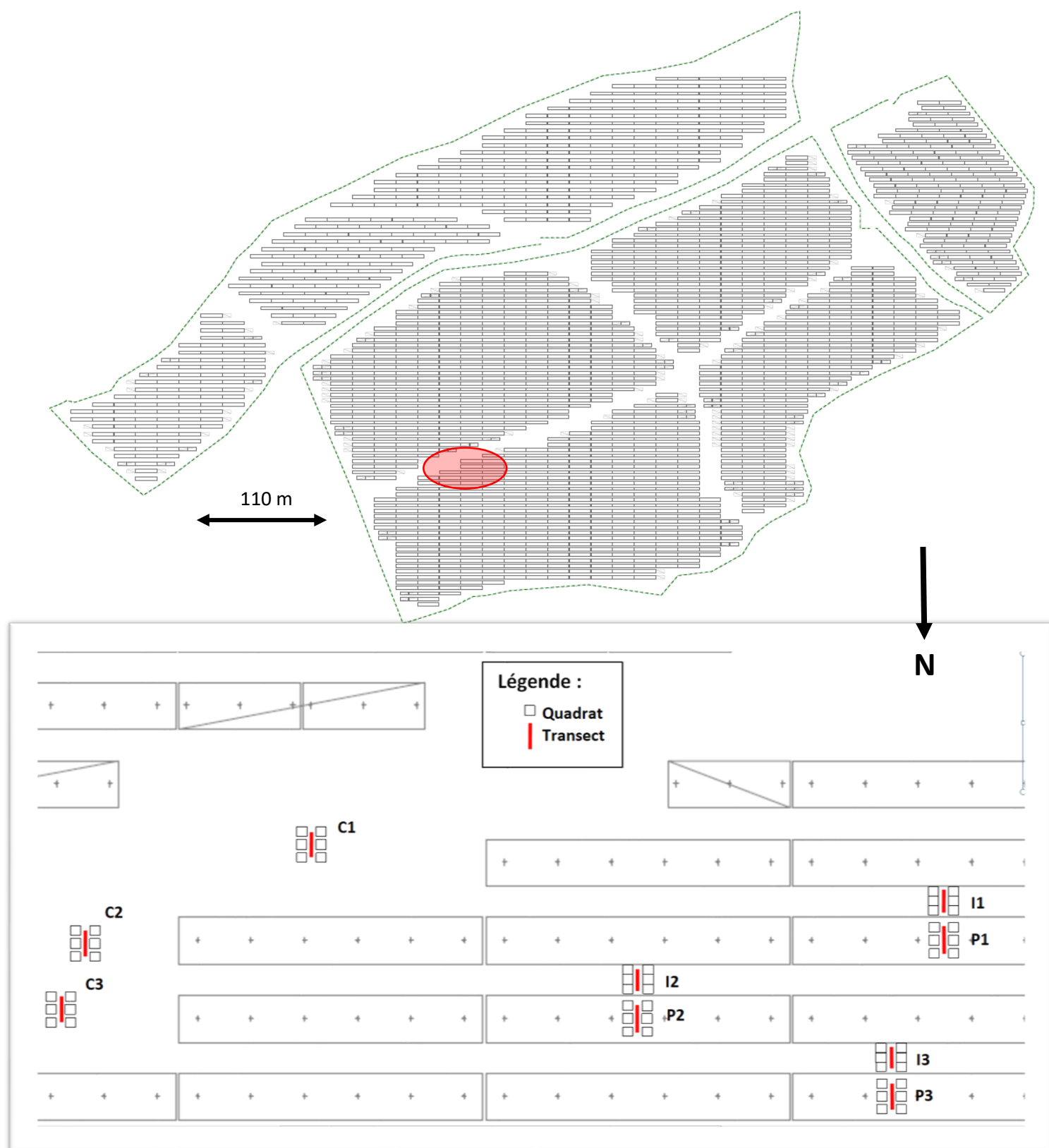
Annexe 2 : Relevé botanique sur le site de Marmanhac par traitement avec le pourcentage de recouvrement dans la zone en exclos ; - : absent des transects ; case grise et gras : présent dans les zones du parc ; Moyenne du recouvrement de 18 quadrats (0,5 x 0,5 m) par traitement

Espèce	Panneaux	Inter-rangée	Contrôle
<i>Achillea millefolium</i>	-	<b>4.4</b>	<b>3.4</b>
<i>Agrostis capillaris</i>	-	-	0.7
<i>Aphanes arvensis</i>	-	2.3	0.4
<i>Arrhenatherum elatius</i>	81.7	45.0	63.3
<i>Bromus hordeaceus</i>	-	<b>2.8</b>	<b>3.7</b>
<i>Cerastium glomeratum</i>	-	<b>1.6</b>	<b>1.4</b>
<i>Clinopodium vulgare</i>	-	0.6	-
<i>Convolvulus arvensis</i>	-	-	0.1
<i>Cynosurus cristatus</i>		-	-
<i>Cytisus scoparius</i>	-	-	0.4
<i>Dactylis glomerata</i>	<b>0.6</b>	-	-
<i>Epilobium sp.</i>	<b>0.2</b>	-	-
<i>Festuca ovina</i>	-	-	<b>26.1</b>
<i>Geranium dissectum</i>	-	-	0.1
<i>Holcus lanatus</i>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>
<i>Hypochoeris radicata</i>	<b>0.1</b>	<b>5.3</b>	<b>10.8</b>
<i>Juncus sp.</i>	-	-	
<i>Lolium perenne</i>	<b>0.1</b>	-	<b>0.3</b>
<i>Plantago lanceolata</i>	-	<b>0.4</b>	<b>5.9</b>
<i>Poa pratensis</i>	<b>12.5</b>	<b>8.3</b>	<b>0.3</b>
<i>Pteridium aquilinum</i>	<b>0.7</b>	-	-
<i>Ranunculus acris</i>	<b>0.1</b>	<b>1.9</b>	<b>0.1</b>
<i>Rubus sp.</i>	-		
<i>Rumex acetosella</i>	-	-	<b>0.9</b>
<i>Taraxacum officinale</i>	<b>0.4</b>	<b>0.1</b>	-
<i>Trifolium dubium</i>	-	<b>0.6</b>	<b>8.1</b>
<i>Trifolium repens</i>	<b>0.1</b>	<b>3.8</b>	<b>0.6</b>
<i>Veronica arvensis</i>	-	<b>2.3</b>	0.3
<i>Veronica persica</i>	<b>0.7</b>	0.1	<b>0.6</b>

Annexe 3 : Localisation de la zone en exclos (rouge) sur le plan du parc de Braize et localisation des transects et des quadrats sur la zone zoomée. P : Panneaux ; I : Inter-rangée ; C : Contrôle



Annexe 4 : Localisation de la zone en exclos (rouge) sur le plan du parc de Marmanhac et localisation des transects et des quadrats sur la zone zoomée. P : Panneaux ; I : Inter-rangée ; C : Contrôle



## **Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur deux sites prairiaux**

**RÉSUMÉ** - Les systèmes agrivoltaïques sont apparus afin de répondre au défi d'assurer sur le même site une production d'énergie renouvelable et une production agricole. Cependant, l'installation de panneaux solaires induit une modification du microclimat comme la répartition des précipitations, de température et de rayonnements. Ces modifications impactent la dynamique végétale. Les recherches de ces impacts liés à l'agrivoltaïsme n'étant qu'à leur début, un projet s'est monté entre deux PME de centrale solaire et l'UREP de l'INRAE en Auvergne. Les objectifs sont de suivre, sur deux sites, les effets de la présence des panneaux solaires, en période estivale, sur la dynamique prairiale en comparant différentes variables associées aux plantes et au microclimat par rapport à des conditions d'ombrage variable. Pour séparer les effets directs des panneaux solaires, des suivis ont été réalisés en exclos et comparés à des suivis à l'échelle du parc pâturé. Les résultats ont montré une modification du cortège floristique à long terme sous les panneaux avec une chute de la richesse spécifique liée à la dominance d'une espèce présentant des modifications phénotypiques. De plus, sous les panneaux, en été, le potentiel de croissance, l'état de la végétation et sa qualité se sont retrouvés avantagés, grâce aux panneaux solaires, protégeant des stress hydriques, lumineux et thermiques. Le sol est plus humide et plus frais comparé aux zones ensoleillées. Ces dernières ont une croissance ralentie et un fourrage de moins bonne qualité. Cependant, la productivité à l'ombre n'a pas présenté une plus grande biomasse que la végétation située en pleine lumière. Les effets positifs liés aux panneaux comme l'efficacité d'utilisation de l'eau et l'efficacité d'interception des rayonnements sont contrebalancés par les perturbations ovines, le pourcentage de sol nu diminuant la densité végétale. Une étude à long terme permettrait de connaître les effets face aux sécheresses et canicules plus fréquentes.

Mots clefs : Agrivoltaïsme, microclimat, croissance, biomasse, diversité végétale

## **Plant dynamics under the influence of photovoltaic panels on two grazed meadow sites**

**ABSTRACT** - Agrivoltaic systems emerged to deal with the dual challenge of ensuring renewable energy production and agricultural production on the same site. However, the installation of a solar panel induces a modification of the microclimate regarding the distribution of precipitation, temperature and radiation. These modifications impact plant dynamics. As research on its impacts related to agrivoltaism is still in its infancy, a project has been set up between two solar power companies and the UREP of the INRAE in Auvergne. The objectives are to monitor on two different sites, during summer, the effects of solar panels on the meadow dynamics by comparing different variables associated with plants and microclimate in relation to variable shading conditions. In order to separate the direct effects of the solar panels, monitoring was carried out with exclosures and compared to monitor at the scale of the grazed park. The results showed a modification of long-term floristic status under the panels with a decrease in species richness linked to the dominance of a species with phenotypic modifications. Moreover, the growth potential as well as the state of the vegetation and its quality were found to be better under the panels, thanks to the protection they offer regarding hydric, luminous and thermal stress in summer compared to sunny areas. The sunny areas have slower growth and poorer forage quality. However, productivity in the shade did not show a greater biomass than vegetation in the sun. Positive effects related to the panels such as water use efficiency and radiation interception efficiency are counterbalanced by sheep disturbance and the percentage of bare soil decreasing plant density. A long-term study would allow to determine the effects in the context of more frequent droughts and heat waves.

Keywords: Agrivoltaism, microclimate, growth, biomass, plant diversity