



**HAL**  
open science

## Rapport de deux ans de suivis en exclos sur deux sites agrivoltaïques à panneaux fixes pâturés par des ovins en plaine (Braize) et en moyenne montagne (Marmanhac) et sur un site agrivoltaïque à panneaux trackers en plaine (Eglisottes)

Madej Loan, Brassier Perrine, Luc Michaud, David Colosse, Marilyn Roncoroni, Julien Pottier, Laurence Andanson, Marine Blaise, Catherine Picon-Cochard

### ► To cite this version:

Madej Loan, Brassier Perrine, Luc Michaud, David Colosse, Marilyn Roncoroni, et al.. Rapport de deux ans de suivis en exclos sur deux sites agrivoltaïques à panneaux fixes pâturés par des ovins en plaine (Braize) et en moyenne montagne (Marmanhac) et sur un site agrivoltaïque à panneaux trackers en plaine (Eglisottes). INRAE; UREP. 2024. hal-04728803

**HAL Id: hal-04728803**

<https://hal.science/hal-04728803v1>

Submitted on 9 Oct 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Rapport de deux ans de suivis en exclos sur deux sites agrivoltaïques à panneaux fixes pâturés par des ovins en plaine (Braize) et en moyenne montagne (Marmanhac) et sur un site agrivoltaïque à panneaux trackers en plaine (Eglisottes)



Madej Loan, Brassier Perrine, Michaud Luc, Colosse David,  
Roncoroni Marilyn, Pottier Julien, Andanson Laurence,  
Blaise Marine, Picon-Cochard Catherine

INRAE, VetAgro Sup, UREP, 63000 Clermont-Ferrand, France

**Décembre 2023**

## TABLE DES MATIERES

Généralités .....	3
1 Matériels et methodes .....	4
2 Résultats .....	8
2.1 Partie 1 – Braize.....	8
2.1.1 Variables environnementales.....	8
2.1.1.1 Météorologie .....	8
2.1.1.2 Humidité du sol .....	10
2.1.1.3 Température du sol .....	11
2.1.2 Production végétale .....	12
2.1.2.1 Biomasse.....	12
2.1.2.2 Croissance en hauteur.....	15
2.1.2.3 Relation production de biomasse et croissance en hauteur.....	16
2.1.3 Qualité de la prairie.....	17
2.1.3.1 Sol nu .....	17
2.1.3.2 Mousse .....	17
2.1.3.3 Végétation sèche.....	17
2.1.4 Qualité fourragère de la végétation .....	20
2.1.4.1 Azote (N).....	20
2.1.4.2 NDF : fibres totales (insolubles dans les détergents neutres).....	20
2.1.4.3 Carbone (C).....	20
2.1.5 Composition botanique des communautés végétales.....	22
2.1.5.1 Indices de dissimilarité .....	22
2.1.5.2 Comparaison des communautés végétales.....	24
2.1.6 Morphologie des feuilles.....	27
2.1.6.1 Surface foliaire spécifique (SLA).....	27
2.1.6.2 Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC).....	27
2.1.6.3 Densité stomatique .....	28
2.2 Partie 2 – Marmanhac.....	29
2.2.1 Variables environnementales.....	29
2.2.1.1 Météorologie .....	29
2.2.1.2 Humidité du sol .....	31
2.2.1.3 Température du sol .....	32
2.2.2 Production végétale .....	33
2.2.2.1 Biomasse.....	33
2.2.2.2 Croissance en hauteur.....	35
2.2.2.3 Relation production de biomasse et croissance en hauteur.....	36
2.2.3 Qualité de la prairie.....	37
2.2.3.1 Sol nu .....	37
2.2.3.2 Mousse .....	37
2.2.3.3 Végétation sèche.....	39
2.2.4 Qualité fourragère de la végétation .....	40
2.2.4.1 Azote (N).....	40
2.2.4.2 NDF : fibres totales (insolubles dans les détergents neutres).....	41
2.2.4.3 Carbone (C).....	41
2.2.5 Composition botanique des communautés végétales.....	43
2.2.5.1 Indices de dissimilarité .....	43
2.2.5.2 Comparaison des communautés végétales.....	44
2.2.6 Morphologie des feuilles.....	48
2.2.6.1 Surface foliaire spécifique (SLA) .....	48
2.2.6.2 Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC).....	48

2.2.6.3	Densité stomatique .....	48
2.3	Partie 3 – Eglisottes .....	50
2.3.1	Variables environnementales.....	50
2.3.1.1	Météorologie.....	50
2.3.1.1	Humidité du sol .....	52
2.3.1.1	Température du sol .....	53
2.3.2	Production végétale .....	54
2.3.2.1	Biomasse.....	54
2.3.2.1	Croissance en hauteur.....	56
2.3.2.1	Relation production de biomasse et croissance en hauteur.....	57
2.3.3	Qualité de la prairie.....	58
2.3.3.1	Sol nu.....	58
2.3.3.1	Mousse .....	58
2.3.3.1	Végétation sèche.....	59
2.3.4	Qualité de la végétation (en cours).....	59
2.3.4.1	Azote (N).....	59
2.3.4.2	NDF : fibres totales (insolubles dans les détergents neutres).....	59
2.3.4.3	Carbone (C).....	59
2.3.5	Composition botanique des communautés végétales.....	61
2.3.5.1	Indices de dissimilarité .....	61
2.3.5.1	Comparaison des communautés végétales.....	62
2.3.6	Morphologie des feuilles.....	65
2.3.6.1	Surface foliaire spécifique (SLA).....	65
2.3.6.1	Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC).....	65
2.3.6.2	Densité stomatique .....	66
3	Résumé.....	67
3.1	Braize.....	67
3.2	Marmanhac .....	68
3.3	Eglisottes .....	69
4	Conclusions générales.....	70

Ce travail a été financé par JPEE et Photosol et par l'Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP, INRAE). Les travaux ont été menés librement par l'UREP que ce soit au niveau de la mise en place des protocoles, des mesures, l'analyse des données, la rédaction et l'interprétation des résultats. Les sites suivis ont été mis à disposition par les deux PME pour réaliser les travaux de recherche. Ceux-ci sont gérés par des agriculteurs dont les informations sur les dates de pâturage, le chargement animal et la localisation du troupeau n'ont pas toujours été disponibles pour l'UREP.

## GENERALITES

---

Il est important de noter que les trois sites ne se ressemblent ni en matière d'infrastructures, ni en termes de conditions pédoclimatiques ni en termes de composition botanique. Ainsi, les résultats obtenus sur les trois sites sont propres à chacun et ne sont pas entièrement généralisables à tous les parcs agrivoltaïques. Pour entièrement dissocier les effets des trois éléments cités précédemment, il faudrait comparer des sites ayant deux éléments semblables et un élément dissociatif. Ce qui n'est pas le cas ici. De plus, les réponses mesurées ont été obtenues sur de la végétation coupée tous les mois permettant de simuler un pâturage mensuel, ce qui exclut une généralisation sur des données obtenues sur une végétation plus mature qui pourrait répondre différemment. Cependant chaque site correspond à des situations existantes dans d'autres parcs permettant de donner des conclusions extrapolables à d'autres sites présentant des similitudes en termes de pédoclimat, végétation et dimension des panneaux solaires et inter-rangée.

De plus, il faut noter que cette étude ne rassemble des données que sur deux ans. Ce très court terme ne permet pas de généraliser sur le devenir des sites. Effectivement, les conditions météorologiques peuvent varier d'une année à l'autre et la végétation présente un temps de réponse plus ou moins variable aux changements/perturbations, qui dépend de conditions locales (lumière, banque de graines présente dans le sol, plasticité des espèces, ...). Il en ressort toutefois de forts effets marquants liés à la présence des panneaux solaires sur les deux sites.

# 1 MATERIELS ET METHODES

Trois sites agrivoltaïques déjà en exploitation et pâturés par des ovins depuis plusieurs années ont été sélectionnés pour réaliser des suivis. Le site de Braize, en plaine avec un sol sableux, dans l'Allier (46.68°N, 2.64°E, 235 m d'altitude) était une ancienne pépinière devenue friche avant construction. La mise en service date d'octobre 2018. Le site de Marmanhac, en moyenne montagne avec un andosol limono-sableux, dans le Cantal (45.02°N, 2.45°E, 840 m d'altitude) était une prairie avant construction. La mise en service date de janvier 2014. Le site des Eglisottes et Chalaurnes, en plaine alluviale avec un sol sablo-limoneux, situé en Gironde (46.68°N, 2.64°E, 30 m d'altitude) était une friche depuis 10 ans avant son installation. La mise en service date de novembre 2017. Les prairies de ces trois parcs ne sont pas fertilisées et pâturées par des ovins pour Braize et Marmanhac et par des caprins pour Eglisottes.

Les deux premiers sites (Braize et Marmanhac) disposent d'infrastructures fixes au sol, inclinés à 25° orientés vers le Sud. Les infrastructures varient d'un site à l'autre, notamment en largeur et hauteur maximale de table, ainsi que dans l'écartement des rangées comme illustré dans la photographie 1. Le troisième site (Eglisottes) dispose d'infrastructures de panneaux trackers à un axe (inclinaison Est-Ouest) avec des rangées alignées en Nord-Sud. Lorsque les panneaux sont inclinés à 30° (Photographie 1), les inter-rangées mesurent 5m80. A l'horizontale, les panneaux sont à 2 m de haut et la table a une largeur de 3m30.

Sur Marmanhac, le parc mesure 12.97 ha avec 6.66 ha d'empreinte des panneaux au sol, 4.08 ha en inter-rangée, 2.07 ha en contrôle et 0.16 ha d'autres (chemin, poste de transformation...). Sur Braize, le parc mesure 16.87 ha avec 6.46 ha d'empreinte des panneaux au sol, 7.30 ha en inter-rangée, 2.63 ha en contrôle et 0.48 ha d'autres (dalle bétonnée de l'ancienne pépinière, chemin, poste de transformation...). Soit une empreinte au sol des panneaux de 38% et 51%, respectivement. En prenant en compte la catégorie « autres », cela revient à 41% et 53% d'empreinte du photovoltaïsme sur la prairie. Sur Eglisottes, le parc mesure 2.82 ha avec 0.93 ha d'empreinte des panneaux au sol en ayant les panneaux à l'horizontale, 1.34 ha en inter-rangée, 0.54 ha en contrôle et 0.02 ha d'autres (chemin, poste de transformation...). L'empreinte au sol des panneaux est donc de 33 % et une empreinte du photovoltaïsme sur la prairie de 33.5 %.

Entre juillet 2020 et mars 2023 (Braize et Marmanhac) ou entre mars 2022 et octobre 2023 (Eglisottes), les mesures ont été réalisées sur des zones d'échantillonnages protégées du pâturage des ovins/caprins (en exclos) et pour trois traitements : sous panneaux solaires (P), en inter-rangées, avec une ombre variable en fonction de la journée et des saisons (I) et en pleine lumière, éloigné des panneaux (contrôle : C). Des capteurs ont été installés dans la zone d'exclos pour mesurer les variations du microclimat aérien à une hauteur de 30 cm du sol (rayonnement (PAR -  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), pluviométrie (mm), température (°C) et humidité de l'air (%)) et souterrain à 20 cm de profondeur (sonde de température (°C) et d'humidité du sol (%)) et connectés à une station d'acquisition, afin d'enregistrer les variables et d'évaluer les conséquences sur la végétation et le sol. Les sondes ont été disposées en lignes appelées transects dans chaque traitement (localisées par des points rouges ou oranges – Photographie 2), à raison de 3 transects par traitement et 3 sondes par transect (Photographie 3). L'écartement entre les sondes dans un transect est calculé en fonction d'une disposition avec des panneaux fixes (inclinaison 25-30°) pour uniformiser les protocoles entre les deux types d'infrastructures. Le dispositif de suivi a été installé loin des bords du site pour éviter un effet de bordure et des zones très tassées par le passage des engins de chantier lors de la mise en place des parcs. Sur le site d'Eglisottes avec des rangées orientées Nord-Sud, les suivis en Inter-rangée et



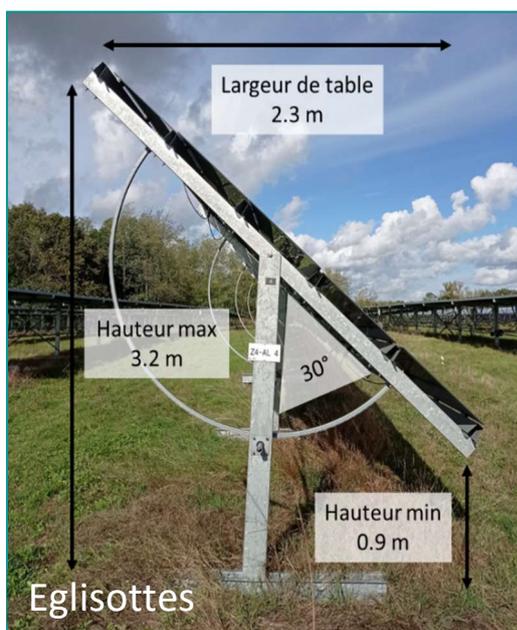
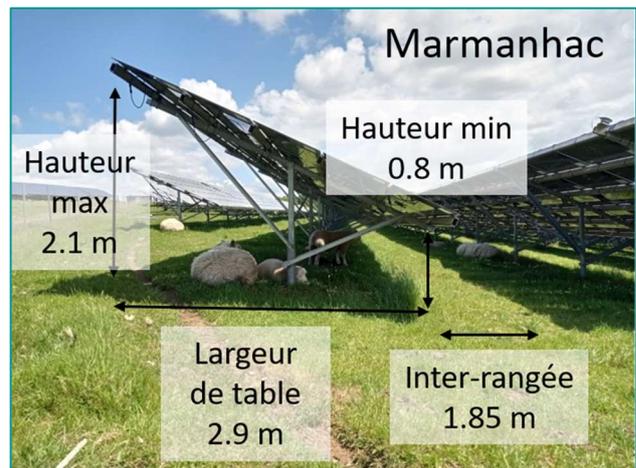
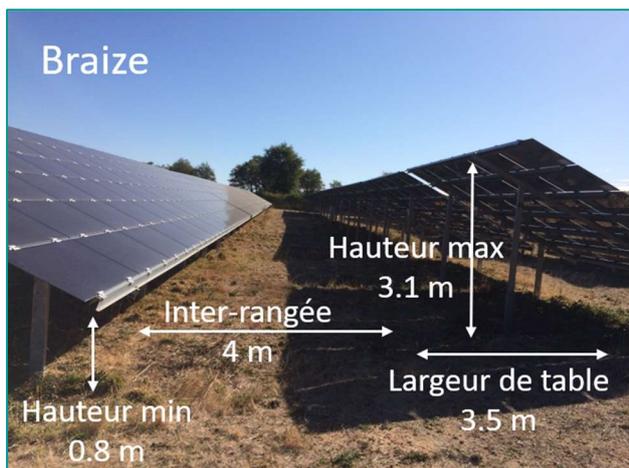
Panneaux ont été installés le plus au Nord possible du début d'une rangée donnant vers le Sud pour éviter l'effet bordure liée au rayonnement.

Les données météorologiques sont recueillies chaque deux minutes puis moyennées toutes les 30 minutes. Elles sont ensuite moyennées ou cumulées sur le même pas de temps que des périodes de repousse de la végétation.

Le site de Marmanhac a rencontré des problèmes d'acquisitions de données météorologiques pour diverses raisons. Pour compenser cette absence de données, elles ont été calculées par la méthode du gapfilling, qui consiste en un traitement informatique en imputant les données manquantes par rapport à un pattern précédent ou venant de données corrélées (méthode MissForrest). Ce procédé a aussi été utilisé sur les deux sites (B et M) pour estimer les données des capteurs installés ultérieurement au début de l'expérimentation. Cependant, cette méthode reste incertaine et peut éprouver des difficultés pour l'estimation de données manquantes surtout quand le jeu de données reste relativement petit et d'autant plus sur des données météo variants journalièrement et saisonnièrement.

Le site d'Eglisottes a rencontré des problèmes de rotations des panneaux en gardant les panneaux bloqués à l'horizontale en Août 2022 et de Juin à Novembre 2023. Ceci a donc impacté la végétation et le microclimat sous panneaux.

Photographie 1 : Infrastructures des panneaux solaires fixes sur le site de Braize et Marmanhac et des panneaux trackers sur Eglisottes.



En parallèle, dans des quadrats (0.50 x 0.50 m, n = 54), entourant chaque sonde (carré sur la photographie 2), un suivi mensuel de la végétation a été réalisé tout en simulant la défoliation par les ovins (coupe de la végétation à 5 cm de hauteur). Des mesures de hauteur (cinq points à l'herbomètre par quadrat) pour déterminer la croissance journalière ( $\text{cm j}^{-1}$ ) ont été enregistrées chaque mois aux mêmes endroits après une période de repousse de la végétation.

Pour quantifier et qualifier l'état de l'herbe et de la prairie, des relevés de recouvrement de mousse, sol nu et végétation sèche sont estimés à l'œil par le même expérimentateur sur chaque quadrat. La végétation est ensuite coupée chaque mois pour déterminer la biomasse produite après un séchage à l'étuve ( $60^\circ\text{C} - 48\text{h}$ ).

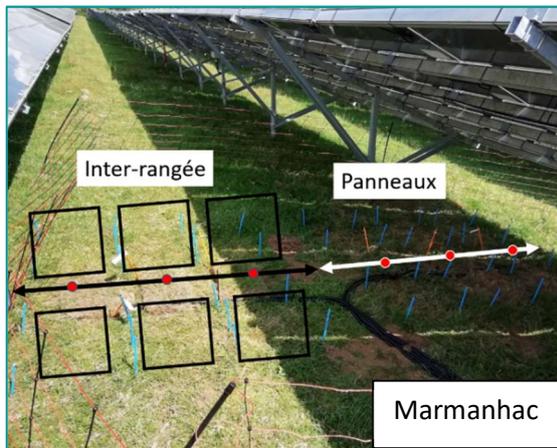
Cependant, les quadrats n'ont pas été coupés entre

octobre 2020 et mars 2021 ainsi qu'entre octobre 2022 et mars 2023 (Braize et Marmanhac) ou entre octobre 2022 et février 2023 (Eglisottes) pendant les périodes automnale et hivernale, ni de juin 2021 à mars 2022 (B et M). Deux lots de quadrats ont été utilisés pour le suivi. Pour Braize et Marmanhac, un premier lot de quadrats entourant directement les sondes est suivi de juillet 2020 à mars 2021. Ensuite de mars à mai 2021, d'autres quadrats juxtaposés aux anciens, mais distants des sondes par les anciens quadrats sont suivis. Enfin, sur la deuxième année, le suivi s'est réalisé sur les premiers quadrats. Concernant Eglisottes, le déplacement des anciens aux nouveaux quadrats s'est passé entre la première et deuxième année. La production de biomasse ( $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ) a été pondérée par le nombre de jours de la période de repousse pour faciliter la comparaison, car ces dernières peuvent présenter des temps de pousse variables d'un mois à l'autre allant de 23 à 36 jours en fonction des périodes et des sites. Les quadrats face à face autour d'une sonde sont moyennés ensemble avant les analyses statistiques ( $n = 9/\text{traitement}/\text{période}$ ).

La végétation ainsi échantillonnée, une fois broyée en poudre (1 mm), est passée dans un spectromètre NIRS (Spectroscopie dans l'infrarouge proche). Ceci nous a permis de sélectionner certains échantillons à analyser chimiquement (azote et carbone total (méthode Dumas), NDF (Fibres à détergent neutre ; méthode Van Soest appliquée au Fibersac)) pour ensuite estimer les échantillons restants grâce aux spectres.

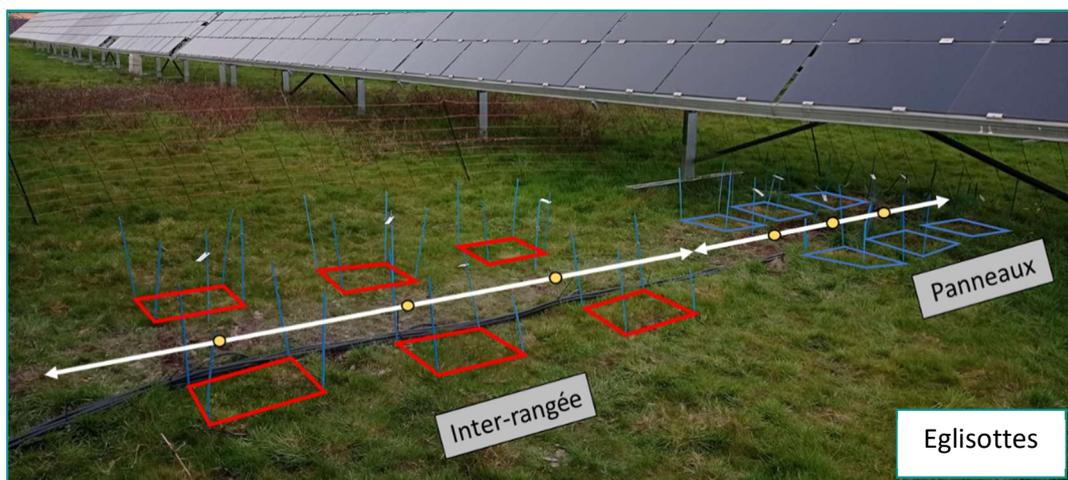
Sur Braize et Marmanhac et sur ces quadrats de végétations, cinq relevés botaniques ont été effectués pour connaître les espèces présentes et leur recouvrement. Un relevé par printemps 2020, 2021 et 2022 ainsi qu'un en automne 2020 et 2022. Pour Eglisottes, trois relevés botaniques ont été effectués, à raison d'un par printemps 2022, 2023 ainsi qu'un en automne 2023.

Photographie 2 : Dispositif expérimental sous forme de transect dans chaque traitement



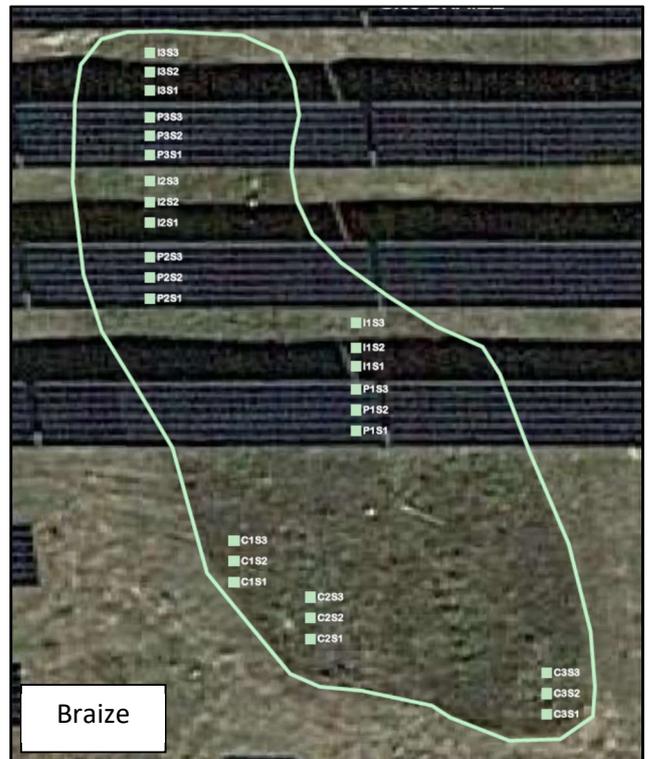
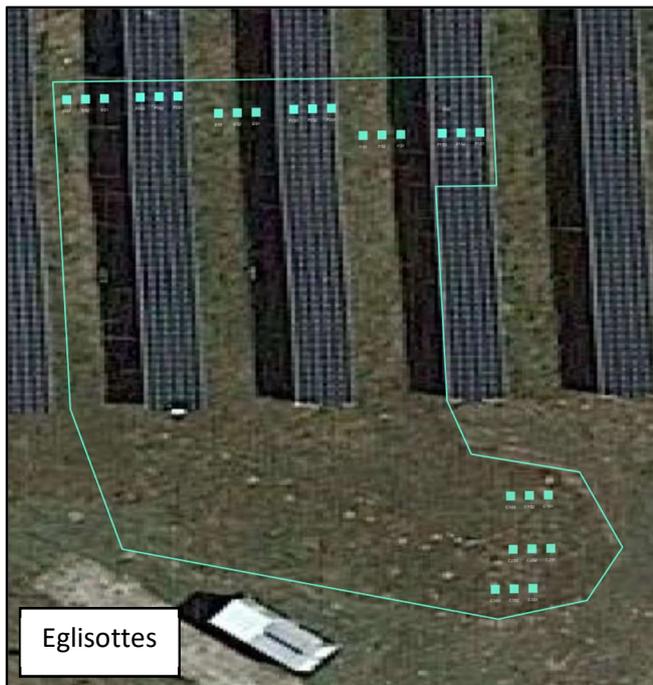
Lors de la campagne botanique au printemps 2023 (absence des ovins), les feuilles matures des espèces dominantes (10 par espèce, 9 à 10 espèces différentes par site) dans la zone en exclos et sa périphérie ont été récoltées pour ensuite calculer la surface foliaire spécifique (SLA,  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) et la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC,  $\text{g g}^{-1}$ ) à l'aide d'un planimètre (mesure de surface foliaire) et d'une balance. Des empreintes stomatiques ont été réalisées sur les deux faces de trois feuilles fraîches pour ensuite compter le nombre de stomates au microscope ( $\times 10$ ).

L'ensemble des données sont traitées statistiquement avec le logiciel R (4.3.1). Des modèles généralisés mixtes avec une hiérarchisation spatiale ont été effectués pour chaque variable et



par pas de temps (deux ans, par année de suivi, par saison, par période de repousse). En fonction de la normalité des données et de l'homoscédasticité des variances, avec ou sans transformation de boxcox, soit une comparaison de moyenne par Anova suivi d'un test post-hoc de Tukey soit un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test post-hoc de Dunn ont été effectués. Pour traiter les données botaniques, la méthode de Baselga [4] a été suivie pour obtenir les indices de dissimilarité et la méthode de Thioulouse [5] pour la BGA (Between group analysis).

Photographie 3 : Disposition en transect en vue aérienne des sondes pour la mesure de température et l'humidité du sol (SMT100) sur les sites d'Eglisottes et de Braize.



## 2 RESULTATS

### 2.1 PARTIE 1 – BRAIZE

#### 2.1.1 Variables environnementales

##### 2.1.1.1 Météorologie

Tableau 1 : Données météorologiques mesurées par des capteurs aériens sur le site de Braize, moyenne par mois de repousse de la végétation et moyenne annuelle.

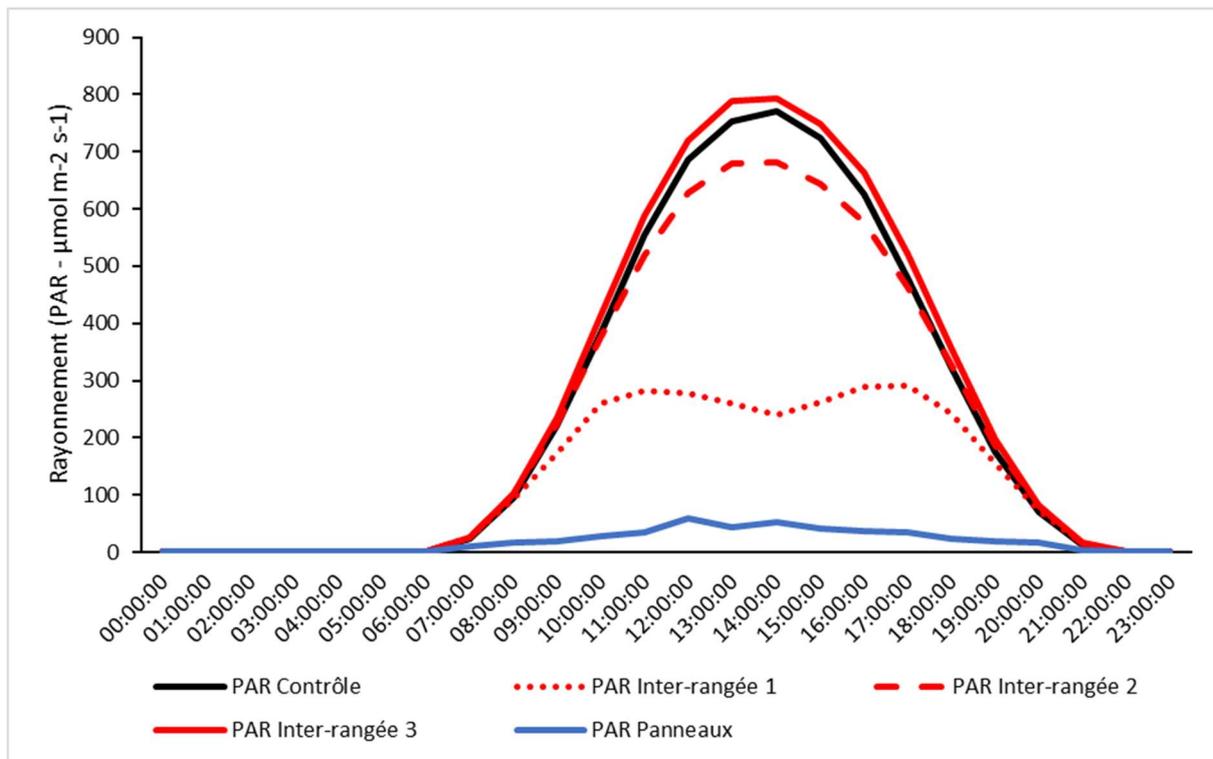
Braize			Nombre de jour gapfillé				Rayonnement journalier (PAR - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			Cumul de précipitations (mm)			Humidité relative (%)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Depuis 2020 aérien	Depuis 2020 sonde	BFS	Installé en 2022	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Nombre de jour avec pluie	Contrôle	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Juillet	1	29	0	0	20	29	535.96	486.48	37.67	7 (24%)	22.92	1.36	67.64	67.46	64.88
Aout	1	28	0	0	15	28	525.39	446.87	35.15	7 (25%)	23.92	1.55	57.25	57.19	55.48
Septembre	1	32	0	0	13	32	420.44	335.95	27.42	9 (28%)	22.54	0.87	67.46	68.00	66.01
Octobre	1	31	0	0	15	31	182.36	136.37	15.49	21 (68%)	114.46	2.75	82.39	82.67	80.00
Octobre-Mars	1	141	0	0	63	141	100.37	64.83	8.92	111 (79%)	299.10	88.36	85.85	85.72	82.04
Mars	1	27	0	0	16	27	275.07	198.13	17.65	18 (67%)	39.68	3.04	76.43	76.73	72.53
Avril	1	32	0	0	10	32	376.92	321.97	24.14	14 (44%)	37.40	2.94	69.70	70.29	66.82
Mai	1	29	0	0	29	29	394.45	293.88	29.91	20 (69%)	80.05	8.92	73.59	73.75	70.31
2020-2021		349	0	0	181	349	351.37	285.56	24.54	207 (59%)	640.07	109.79	72.54	72.73	69.76
Interruption		287	0	0	287	287	223.43	187.54	17.08	234 (82%)	608.94	61.46	82.43	82.35	79.22
Mars	2	24	0	0	24	24	218.16	180.64	18.39	9 (38%)	23.92	1.83	74.60	75.04	71.18
Avril	2	32	0	0	32	32	383.48	336.99	27.70	20 (63%)	15.40	3.30	74.58	74.98	71.37
Mai	2	23	0	0	23	22	422.73	325.65	32.23	10 (43%)	23.05	4.60	69.85	70.09	67.02
Juin	2	32	0	0	32	0	434.61	456.33	34.00	25 (78%)	109.04	7.80	73.96	73.67	71.34
Juillet	2	32	0	0	32	0	469.19	479.43	31.66	5 (16%)	3.72	0.82	63.89	63.64	61.68
Aout	2	32	0	0	32	0	347.15	318.72	20.11	21 (66%)	51.99	1.48	67.66	67.79	65.88
Septembre	2	34	0	0	34	0	214.57	153.78	14.25	29 (85%)	77.81	2.94	82.97	83.32	80.99
Octobre	2	28	0	0	28	0	110.45	61.91	10.59	21 (75%)	35.11	1.73	82.55	82.44	79.46
Octobre-Mars	2	123	0	0	123	0	69.90	44.28	7.20	85 (69%)	193.55	74.62	88.92	88.74	84.95
2022		360	0	0	360	78	296.69	261.97	21.79	225 (63%)	533.57	99.12	75.44	75.52	72.65

Braize			Température journalière de l'air (°C)			Ecart journalier moyen (°C ; Max-Min)			Moyenne Maximum   Minimum (°C)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Juillet	1	29	19.07	19.25	19.27						
Aout	1	28	22.47	22.65	22.58						
Septembre	1	32	18.82	18.89	19.06						
Octobre	1	31	13.79	13.79	14.12						
Octobre-Mars	1	141	6.78	6.79	7.08						
Mars	1	27	6.92	6.91	7.16						
Avril	1	32	8.65	8.65	8.91						
Mai	1	29	12.78	12.82	13.08						
2020-2021		349	13.66	13.72	13.91						
Interruption		287	11.08	11.14	11.36						
Mars	2	24	8.69	8.68	8.96						
Avril	2	32	12.26	12.30	12.52						
Mai	2	23	18.06	18.18	18.26	10.62	11.56	9.80	28.58   17.96	29.3   17.74	28.2   18.4
Juin	2	32	19.83	20.04	19.96	15.42	15.96	14.17	27.73   12.31	28.18   12.22	27.25   13.08
Juillet	2	32	22.05	22.26	22.10	19.21	19.74	17.23	31.68   12.47	31.99   12.25	30.68   13.45
Aout	2	32	21.21	21.27	21.32	17.65	17.97	16.43	30.59   12.94	30.67   12.7	30.1   13.67
Septembre	2	34	14.47	14.38	14.69	13.22	13.17	12.33	21.66   8.44	21.46   8.29	21.5   9.17
Octobre	2	28	15.11	15.12	15.51	10.63	10.56	10.53	21.17   10.54	21.05   10.48	21.59   11.06
Octobre-Mars	2	123	5.41	5.45	5.70	7.87	7.97	7.67	9.49   1.62	9.58   1.61	9.76   2.09
2022		360	15.23	15.30	15.45	13.52	13.85	12.59	24.41   10.9	24.6   10.76	24.15   11.56

En moyenne annuelle, le rayonnement journalier moyen est légèrement plus faible en deuxième qu'en première année pour chaque traitement (Tableau 1). Effectivement, à partir de la fin d'été 2022, le rayonnement incident est moins important qu'en première année de suivi. Néanmoins, la réduction de rayonnement mesuré sous les panneaux reste de 93% en moyenne annuelle en variant de 94% en été à 90% en hiver. Le rayonnement diffus sous panneaux représente 86% du rayonnement total contre 51% en plein soleil. L'inter-rangée quant à elle montre une réduction moyenne annuelle de 12-19%. Toutefois, cette réduction dépend de la position dans l'inter-rangée, effectivement, en étant

proche du bord haut d'une table de panneaux (Figure 1 ; Inter-rangée 1), la réduction est de 50%, au milieu de l'inter-rangée (Inter-rangée 2), elle est de 6%, proche du bord bas d'une table (Inter-rangée 3), il y a une augmentation de +6%. Cette augmentation, peut être expliquée par un problème de type de capteurs, dont le premier type n'était plus disponible. Effectivement, les capteurs installés en 2022 en Inter-rangée ne sont pas du même fabricant ce qui engendre une différence de sensibilité bien qu'une calibration entre les deux marques ait été faite. C'est pourquoi, les valeurs obtenues en Inter-rangée en 2022 peuvent dépasser celle en Contrôle. Néanmoins, cette réduction moyenne en Inter-rangée n'est pas stable au cours de l'année. Effectivement, la réduction de rayonnement peut aller jusqu'à 44% en automne comme durant la période Octobre 2022. Cet écart se minimise durant les périodes plus ensoleillées comme en Juin 2022 avec un rayonnement similaire au contrôle. En effet, l'ombrage engendré en inter-rangée est variable entre les saisons. En hiver, l'inter-rangée est quasi totalement à l'ombre, alors qu'en été, elle est le plus ensoleillée, avec seule la végétation proche des panneaux côté le plus haut reste à l'ombre. La première année ne possédant pas de capteurs aériens en Inter-rangée, les données manquantes ont été gapfillées. Néanmoins, le ratio ne varie pas comme en deuxième année ce qui indique que le gapfilling est plus efficace pour estimer en moyenne annuelle plutôt que les variations saisonnières.

Figure 1 : Dynamique journalière du rayonnement entre les traitements en moyenne sur deux ans sur Braize. Légende : bleu : Panneaux ; noir : Contrôle ; rouge : Inter-rangée ; 1 : proche haut panneau, 2 : milieu de l'inter-rangée, 3 : proche bas panneau



Les précipitations ont été 1.2 fois plus importantes en année 2020-2021 qu'en année de suivi 2022 sachant que le mois de Juin 2022 est pris en compte alors qu'il n'a pas été suivi en 2020/2021, ce qui sous-estime la différence. Cependant, on remarque qu'il y a proportionnellement le même nombre de jours avec précipitation, 63% des jours en 2022 contre 59% du temps en 2020/2021. Ceci provient essentiellement du gapfilling à l'échelle journalière qui est compliqué pour les précipitations et qui se voit notamment en Avril 2022. Néanmoins, on constate que ces faibles précipitations à l'échelle du mois sont cohérentes avec une diminution de l'humidité de l'air et du sol en contrôle. Entre la première année et la deuxième année, le cumul en contrôle a été plus faible pour chaque période sauf en Aout (+28.1 mm) et Septembre (+55.3 mm), où il y a eu plus de précipitations lors de la deuxième année. Le mois de Juillet 2022 a été particulièrement sec en ne présentant quasiment aucune précipitation. Les précipitations sont fortement réduites sous les panneaux, effectivement, les panneaux laissent passer la pluie uniquement du côté le plus haut quand les précipitations tombent avec le bon angle. De plus,

les interstices qui séparent chaque panneau permettent de laisser passer des précipitations en goutte à goutte mais une grande partie de l'eau ruisselle sur les panneaux pour tomber du côté le plus bas. La quantité de précipitations captée par le pluviomètre dépend surtout de sa position sous les panneaux.

Les températures journalières moyennes ont été plus élevées sur la deuxième année de suivi (2022) de 1.6°C par rapport à la première année (2021). Il a notamment fait 5.3°C de plus sur le mois de mai 2022, +3.6°C en avril, +3°C en juillet 2022 et +1.3 et 1.8°C en Octobre et Mars 2022, respectivement. Ces mois plus chauds sont notamment en corrélation avec une forte diminution des précipitations. Inversement, il a fait plus frais en Août (-1.3°C) et en Septembre (- 4.4°C) en 2022. Cependant, sur la période hivernale d'octobre à mars, il a fait plus frais en 2022 mais il y a aussi eu beaucoup moins de précipitations. Entre les deux années, le nombre de jours où la température moyenne est en dessous de 0°C est similaire pour le contrôle mais plus important en Inter-rangée et sous les panneaux. Cependant, le gapfilling concernant la température montre des faiblesses pour les températures négatives, ainsi la comparaison n'est pas forcément fiable d'un point de vue journalier. En regardant uniquement 2022 sans gapfilling, on remarque qu'il y a trois jours de plus en Inter-rangée où la température moyenne journalière est négative et un jour de plus sous les panneaux par rapport au Contrôle. La température journalière semble présenter moins d'écart entre le minimum et le maximum par journée sous les panneaux, de 1°C en moyenne par rapport aux autres traitements. La différence d'écart entre traitements augmente surtout pendant la période estivale avec un écart réduit de 2°C en moyenne sur la période de Juillet sous les panneaux. L'écart est notamment expliqué par des températures minimales plus chaudes sous les panneaux en moyenne de 0.7°C. Ce minimum sous panneaux se différencie plus, par rapport au plein soleil, lors de forte chaleur et se minimise lors de faible température. A l'inverse, les températures maximales sous panneaux sont plus fraîches pendant de forte chaleur. Cependant, en hiver, les températures maximales sous les panneaux sont légèrement plus chaudes.

Sur le site de Braize, la quantité de rayonnement incident est légèrement plus faible lors de la deuxième année de suivi. Néanmoins, le pourcentage d'ombrage sous panneaux reste très élevé (entre 90 et 94%). Cette réduction est assez stable au cours de l'année. En Inter-rangée, le rayonnement est en moyenne réduit de 12-19% mais cette réduction varie énormément en fonction de la distance aux panneaux et des saisons en lien avec l'inclinaison du soleil.

Les précipitations en deuxième année sont 1.2 fois plus faibles. La quantité de précipitations perçue varie énormément entre le Contrôle et le Panneaux qui ne laisse passer qu'une petite partie des pluies.

Durant la deuxième année, la température journalière est plus chaude de 1.6°C en moyenne annuelle par rapport à la première année. Bien que la température moyenne journalière ne varie que très peu entre les traitements, la température est plus stable sous les Panneaux. Effectivement, l'écart entre le maximum et le minimum journalier est plus faible sous les panneaux et cette différence entre traitements est d'autant plus importante lors de forte température.

### 2.1.1.2 Humidité du sol

En moyenne sur deux ans, l'humidité du sol est 1.4 et 1.5 fois supérieure en Contrôle qu'en Inter-rangée et sous les panneaux respectivement. Ce constat est notamment visible en deuxième année de suivi. Sur la première année de suivi, l'Inter-rangée est intermédiaire. Cependant, ces différences entre traitements apparaissent de manière saisonnière, effectivement, le constat n'est visible que durant

l'automne et l'hiver car il y a plus de précipitations pour le contrôle (Figure 2). Le reste des saisons, l'humidité du sol ne varie pas entre les traitements. D'une année sur l'autre, certaines périodes peuvent montrer des effets différents. Par exemple, en septembre ou en mai, l'humidité est soit similaire entre traitements, soit supérieure en Contrôle par rapport à celle sous les panneaux. Les différences les plus importantes apparaissent durant la période hivernale d'octobre à mars où en moyenne l'humidité en Contrôle est 1.9 et 2 fois plus importante que celle sous les panneaux en première et deuxième année de suivi respectivement.

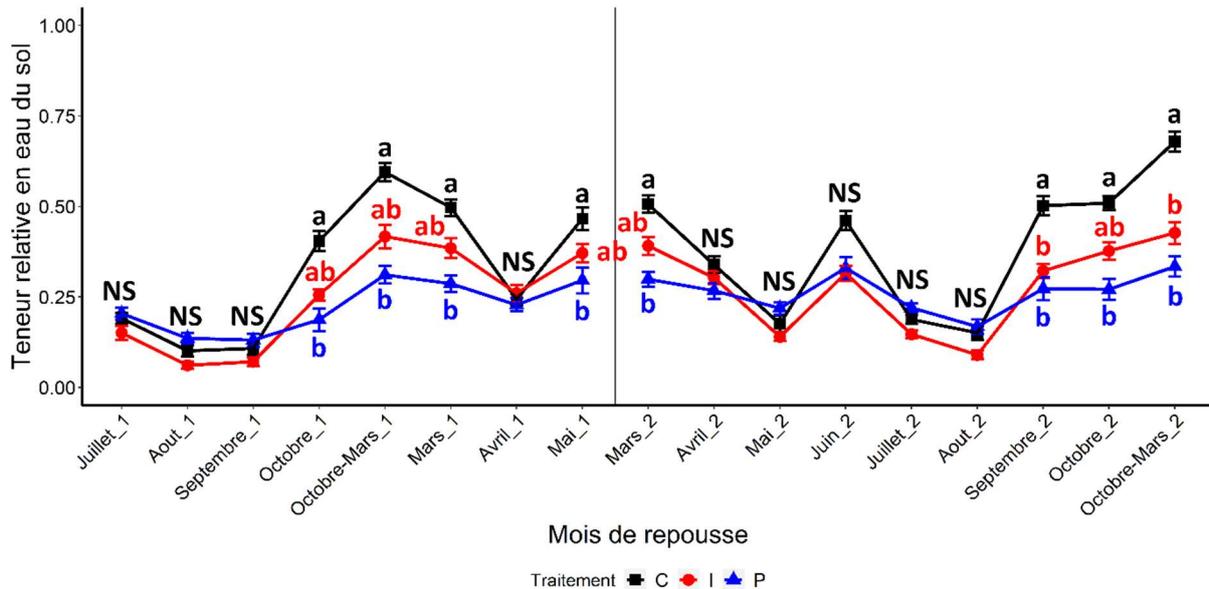


Figure 2 : Dynamique temporelle de la teneur relative en eau du sol, en enclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), l'humidité du sol est 1.4 et 1.5 fois supérieure en Contrôle, en plein soleil, qu'en Inter-rangée et sous les panneaux. Cependant, les différences d'humidité du sol n'apparaissent que durant l'automne et l'hiver où durant ces saisons, l'humidité peut être deux fois plus élevée en Contrôle par rapport aux Panneaux. Au printemps ou en été, l'humidité du sol est similaire. Néanmoins, d'une année sur l'autre, certaines variations peuvent arriver en fonction des conditions météorologiques, comme par exemple en Mai ou en Septembre. Ceci est dû à l'interception des pluies par les panneaux mais aussi à la capacité drainante du sol sableux ce qui limite les transferts horizontaux de l'eau.

### 2.1.1.3 Température du sol

En moyenne sur deux ans, la température du sol en Contrôle est 1.7 et 3.2°C plus chaude qu'en Inter-rangée et sous les panneaux. L'inter-rangée est aussi 1.5°C plus chaude que sous les panneaux. Cette différence est constatée sur les deux années de suivi. Néanmoins, les variations de température ne sont pas identiques entre traitements de façon saisonnière (Figure 3). En été, la température va jusqu'à être 6.6°C et 6.1°C plus fraîche sous les panneaux, respectivement, en août de la première année et en juillet de la deuxième année par rapport au Contrôle. En Inter-rangée, elle y est 4.4 et 4.2°C supérieure aux Panneaux. En automne, la température se rafraîchit plus rapidement en Inter-rangée pour passer

en dessous de celle mesurée sous Panneaux en hiver. Effectivement, sur la période octobre-mars, il fait 1.2 et 1°C plus frais qu'en Contrôle et Panneaux en première année. En deuxième année, il fait respectivement, 0.9 et 0.8°C plus frais. Au printemps, la température en Inter-rangée réaugmente plus vite pour rattraper celle en Contrôle. D'une année sur l'autre, les réponses présentent les mêmes tendances bien que l'intensité puisse varier.

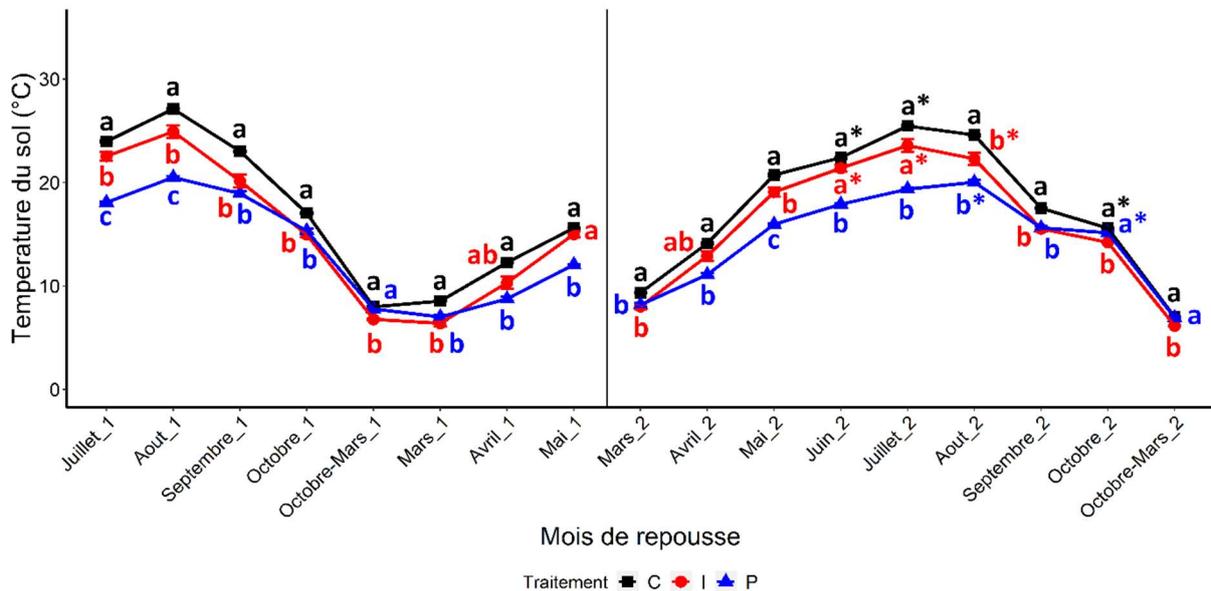


Figure 3 : Dynamique temporelle de la température du sol (°C), en exclus, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale ( $P < 0.1$ ). Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la température du sol est plus élevée en Contrôle, en plein soleil, de 3.2°C par rapport au sol sous les panneaux, et cet écart peut atteindre 6-7°C en juillet ou août en fonction de l'année. L'Inter-rangée, avec une ombre variable, présente une température plus fraîche de 1,7°C en moyenne sur deux ans par rapport au Contrôle, mais le sol y est plus chaud de 1.5°C par rapport aux Panneaux. L'écart entre Inter-rangée et Panneaux peut atteindre plus de 4°C en période estivale.

La présence des panneaux solaires a donc un impact sur les variables météorologiques en les modifiant et en créant ainsi un microclimat contrasté sous les panneaux solaires et en Inter-rangée. Cette influence des panneaux solaires modifie les conditions de développement de la végétation.

## 2.1.2 Production végétale

### 2.1.2.1 Biomasse

En moyenne sur deux ans, la production de biomasse en repousse mensuelle sur les mêmes quadrats est 1.2 et 1.5 fois plus importante sous les panneaux qu'en Contrôle et en Inter-rangée respectivement.

Le Contrôle est 1.2 fois supérieur à l'Inter-rangée ( $P_{2\text{ans}} = 186.09 \pm 5.63 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $I_{2\text{ans}} = 126.94 \pm 9.18 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $C_{2\text{ans}} = 152.7 \pm 6.89 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ). Cependant, à l'échelle annuelle, le cumul en Contrôle est similaire à celui sous les panneaux sur les deux années séparément. Effectivement, les différences ne sont pas assez marquées en cumul annuel pour être observées. Que ce soit lors de la première année de suivi (sans juin) ou de la deuxième année, le cumul de biomasse sur l'ensemble de l'année est 1.5 et 1.4 fois plus élevé sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée (Figure 4). Le Contrôle et l'Inter-rangée sont similaires entre eux. En moyennant les cumuls de biomasse sous les panneaux et en Inter-rangée pour chaque année de suivi, il n'y a pas de différence significative avec le cumul obtenu en Contrôle.

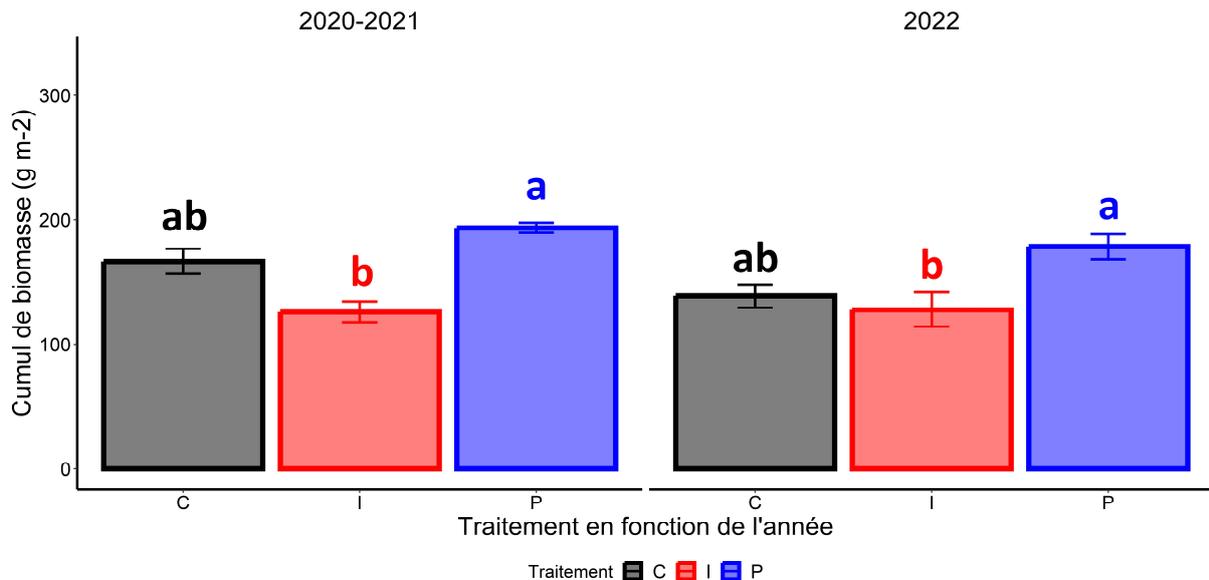


Figure 4 : Cumul annuel de biomasse ( $\text{g m}^{-2}$ ), pour chaque traitement, en exclus, sur le site de Braize. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Cumul annuel  $\pm$  erreur standard par année de suivi. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Ces différences s'observent au cours de l'année, notamment en été, avec un maintien plus important de la production sous les panneaux (C : x1.6, I : x1.8) et en hiver, avec une reprise plus précoce de la production (I : x1.9, C : x2) (Figure 5). Lors des autres saisons, en automne, les productions sont similaires, tandis qu'au printemps, bien que la production soit la plus importante de l'année, la production en Inter-rangée est 1.3 fois inférieure à celle en Contrôle. Ces effets saisonniers sont susceptibles de changer en fonction des conditions météorologiques de l'année. En effet, en été 2020, la différence est observée en août, tandis qu'en été 2022, elle est observable en juillet et en septembre. Il en va de même pour la différence en hiver. Alors que la reprise de la production de biomasse est 2.7 et 3.2 fois plus importante sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée et au Contrôle à la fin de l'hiver 2021, aucune différence est observable pour la même période en 2022. En automne, bien qu'en moyenne sur deux ans aucune différence significative soit observée, il est possible qu'un regain de végétation ait lieu, comme en octobre 2021 sous les panneaux. Enfin, au printemps, pendant la saison de pleine croissance, les effets peuvent s'inverser entre les traitements d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques. Alors qu'en mai 2021, la végétation sans limitation de lumière présente une production de biomasse très élevée, en 2022, durant la même période, les précipitations ont été très faibles, entraînant une chute drastique de la production en plein soleil. De plus, l'absence de données pour le mois de juin 2021 pourrait surestimer les différences observées sur le cumul annuel. En effet, étant donné la production de mai 2021, on pourrait s'attendre à un cumul moins différencié.

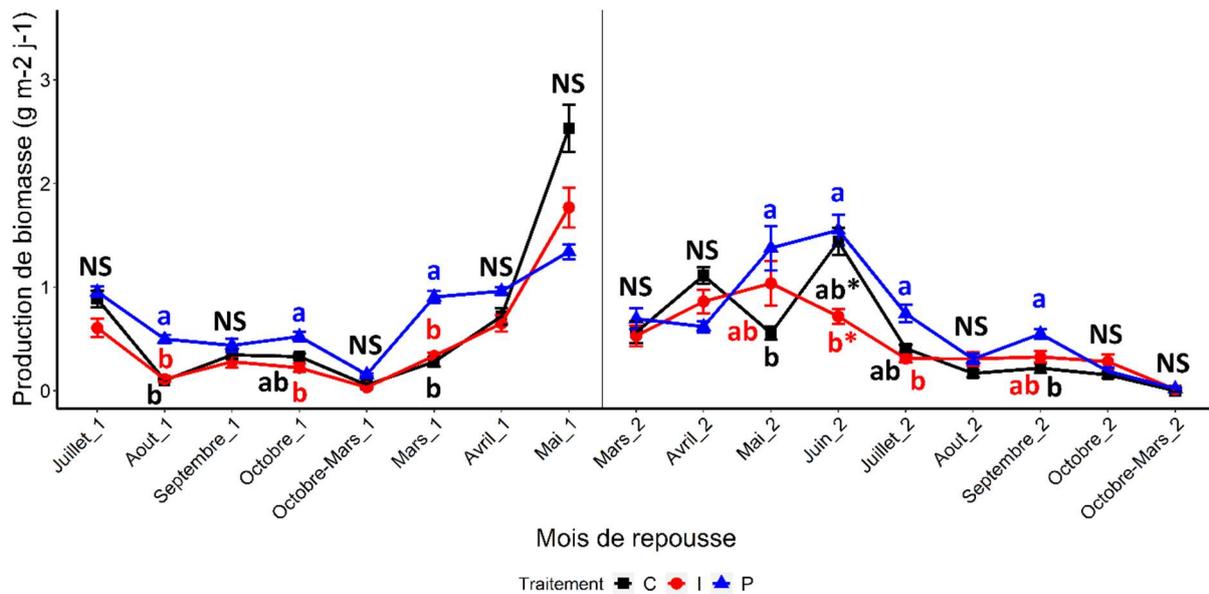


Figure 5 : Dynamique temporelle de la biomasse journalière mesurée après repousse ( $g\ m^{-2}\ j^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale ( $P < 0.1$ ). Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la végétation à l'ombre des panneaux solaires produit 1.2 et 1.5 fois plus de biomasse que celle en plein soleil, en Contrôle et en Inter-rangée avec une ombre variable, respectivement. Le Contrôle produit, sur deux ans, 1.2 fois plus qu'en Inter-rangée. Cependant, la différence de biomasse reste mince à la vue de la faible productivité globale de la prairie et n'est pas présente chaque année. Néanmoins, certains effets marquants au cours de l'année varient d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques, tels que la reprise plus précoce de la production de biomasse à la sortie de l'hiver ou lors de la saison de pleine croissance au printemps, avec une réponse inverse. De plus, la présence des panneaux semble limiter l'impact des sécheresses (mai 2022) et réagir plus lentement à l'apparition des conditions estivales. Le cumul de biomasse dans la zone sous influence des panneaux solaires (Panneaux et Inter-rangée moyennés) est similaire à celui produit en Contrôle. Sur le site de Braize, sur les deux années de suivi, la quantité de fourrage produite est donc similaire dans la zone sous influence des panneaux solaires et dans la zone sans influence. Cependant, une forte hétérogénéité spatiale est créée au sein de notre parcelle d'étude entre les différents traitements.

La biomasse produite, en plus d'être dépendante des conditions météorologiques, est aussi dépendante de variables liées à la végétation elle-même, comme la croissance en hauteur des plantes et la qualité de la prairie.

### 2.1.2.2 Croissance en hauteur

En moyenne sur deux ans, la croissance en hauteur de la végétation sous les panneaux est 1.9 et 2.7 fois supérieures à celle des deux autres traitements, l'Inter-rangée et le Contrôle, respectivement, qui sont similaires entre eux. Cela est observé notamment lors de notre première année de suivi ; cependant, lors de la deuxième année de suivi, la croissance en Inter-rangée tend à être similaire à celle sous les panneaux, tandis que la croissance en Contrôle est la plus faible. De manière saisonnière, on remarque en effet que la croissance est plus importante sous les panneaux par rapport au Contrôle et à l'Inter-rangée, même pendant la période de pleine croissance au printemps (I : x1.6, C : x2) (Figure 6). Seul l'automne présente une croissance similaire entre l'Inter-rangée et les panneaux. C'est notamment en été, avec un maintien de la croissance (I : x2.7, C : x4.6), et en hiver, avec une croissance plus précoce (I : x2.6, C : x4.6), que les écarts sont les plus importants, bien que ce ne soit pas la période où la croissance est la plus rapide. D'une année à l'autre, en fonction des conditions météorologiques, certains effets peuvent apparaître, tels qu'une réduction très marquée, de l'ordre de 4, de la croissance en Contrôle en mai 2022 par rapport à mai 2021. L'année 2022 montre également une croissance plus importante en Inter-rangée et en Contrôle au début de l'année (mars et avril), ainsi qu'en août. Cependant, aucun effet s'inverse entre les traitements avec un changement de conditions météorologiques, contrairement à ce qui est observé avec la production de biomasse.

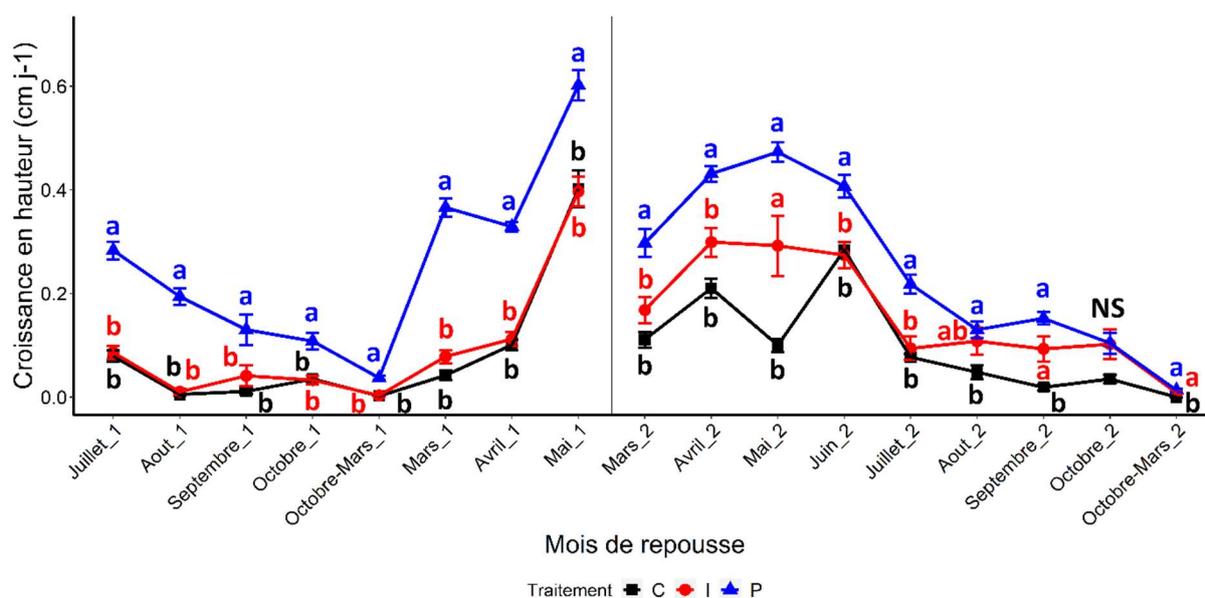


Figure 6 : Dynamique temporelle de la croissance journalière mesurée après repousse ( $\text{cm j}^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après un test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la croissance en hauteur de la végétation à l'ombre sous les panneaux solaires est 1.9 et 2.7 fois plus grande que celle en Inter-rangée, qui est soumise à une ombre variable, et que celle en Contrôle, exposée en plein soleil. Elle est aussi plus précoce à la sortie de l'hiver. D'une année à l'autre, avec les changements météorologiques, les différences entre les traitements varient en intensité, mais elles ne montrent pas d'effets inverses.

---

La production de biomasse et la croissance en hauteur sont donc supérieures en moyenne sur deux ans sous les panneaux. Cependant, les écarts entre les traitements pour ces deux variables ne sont pas du même ordre. En effet, la croissance en hauteur peut présenter des écarts significatifs sans toutefois être observée pour la production de biomasse, comme en juillet 2020, avril 2021 ou mars 2022, par exemple.

---

### 2.1.2.3 Relation production de biomasse et croissance en hauteur

Des relations linéaires ont été obtenues entre la production de biomasse et la croissance en hauteur de la végétation, qui diffèrent entre traitements (Figure 7). Celle obtenue pour le contrôle est significativement différente de celle sous les panneaux ou en Inter-rangée, qui sont similaires entre eux. Il faut donc 3.8 et 2.3 fois plus de croissance en hauteur sous les panneaux et en inter-rangée, respectivement, pour arriver à la même quantité de biomasse produite en Contrôle.

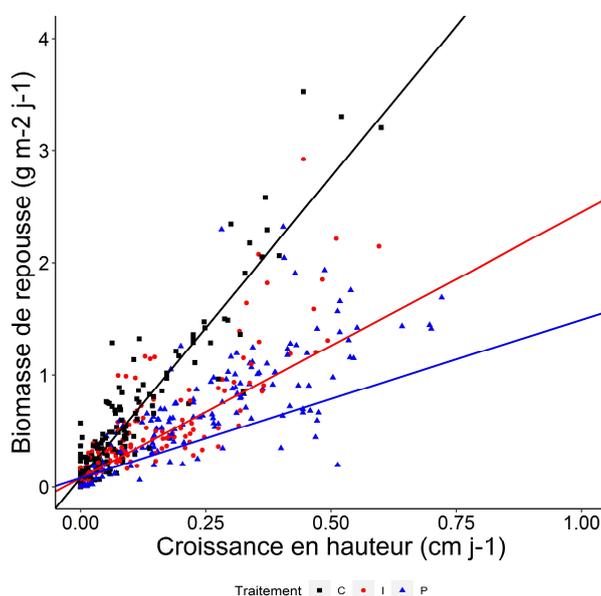


Figure 7 : Relation linéaire de la production journalière de biomasse en fonction de la croissance en hauteur journalière par traitement sur le site de Braize. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

---

Cette forte différence de relation entre la biomasse et la croissance entre les traitements peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Une modification de la qualité de la prairie entre traitements qui impacte la densité de végétation
  - Une modification des communautés végétales entre les traitements
  - Une modification de la physiologie des espèces induite par l'ombrage ≈ étiolement
-

### 2.1.3 Qualité de la prairie

#### 2.1.3.1 Sol nu

En moyenne sur deux ans, la quantité de sol nu visible est 2,2 fois plus importante sous les panneaux par rapport à l'inter-rangée et 2,6 fois plus importante par rapport au contrôle (Figure 8). Cette différence est nettement visible lors de la deuxième année de suivi. Cependant, lors de la première année de suivi, seul le contrôle tendait à présenter moins de sol nu. La quantité de sol nu en contrôle et en inter-rangée a diminué dès le début de l'automne 2021, puis est restée relativement stable dans chaque traitement.

#### 2.1.3.2 Mousse

En moyenne sur un an et demi, la quantité de mousse visible est 3,7 fois supérieure en inter-rangée par rapport à sous les panneaux et 8,9 fois supérieure par rapport au contrôle (Figure 8). Ce constat est observé dans toutes les saisons, à l'exception de l'automne 2022 où la quantité de mousse sous les panneaux augmente légèrement.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité de la prairie diffère nettement entre les traitements. Alors qu'il y a 2.2 à 2.6 fois plus de sol nu sous les panneaux par rapport à l'inter-rangée et au contrôle, il y a 3.7 fois plus de mousse présente en inter-rangée par rapport à sous les panneaux et au contrôle. Ceci signifie que la densité végétale de plantes prairiales est plus faible d'un quart dans les traitements sous influence des panneaux solaires (panneaux et inter-rangée). L'inter-rangée a 22% de recouvrement d'herbacées en moins par rapport au contrôle et 27% de moins pour les panneaux, en moyenne sur deux ans. Cela influence négativement la quantité de biomasse récoltée, contrebalançant ainsi la croissance supérieure observée sous les panneaux. La quantité de sol nu supérieure à l'ombre peut être expliquée par l'effet « splash » lors des précipitations. Le goutte à goutte passant dans les interstices des panneaux vient abîmer la végétation et le sol en dessous. Vu la quantité de rayonnement en moins sous panneaux, une modification de la qualité du rayonnement modifiant le ratio RC:RS (rouge clair : rouge sombre) peut avoir lieu. Une diminution de ce ratio engendre une augmentation de la croissance en hauteur (étiolement) contre une réduction du tallage qui contribue au développement des plantes latéralement et à la densification du couvert. Ceci limitant la colonisation du sol nu. Concernant la quantité de mousse en Inter-rangée, ceci peut provenir soit d'un état de sol perturbé limitant l'implantation des herbacées soit d'une hygrométrie de l'air supérieure, à cause de couloir en inter-rangée où la circulation de l'air est impactée par les panneaux solaires, ce qui modifierait le brassage de l'air et de l'humidité, mais cela ne semble pas être le cas en moyenne mensuelle.

#### 2.1.3.3 Végétation sèche

En moyenne sur deux ans, le recouvrement de la végétation sèche est 1,7 fois supérieur en contrôle par rapport à l'inter-rangée et aux panneaux, avec l'inter-rangée qui tend à être 1,3 fois plus sèche que sous les panneaux (Figure 8). D'une année à l'autre, la quantité de végétation sèche a diminué en inter-rangée. Des différences saisonnières sont observables au cours des années. En automne et en hiver, le recouvrement en végétation sèche ne diffère pas entre les traitements. Au printemps, le contrôle

présente 2,6 et 3,5 fois plus de végétation sèche que l'inter-rangée et les panneaux. En été, l'inter-rangée et le contrôle sont respectivement 1,8 et 2,8 fois plus secs que sous les panneaux, avec le contrôle qui est 1,6 fois plus sec que l'inter-rangée. D'une année à l'autre, au sein des saisons, les effets restent identiques, même si l'intensité des réponses dépend des conditions météorologiques. Néanmoins, en été, la quantité de végétation sèche peut varier, notamment en août et septembre. En effet, le pourcentage de végétation sèche diminue plus tôt en été en 2022 qu'en 2020.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité de la prairie diffère nettement entre les traitements. Alors qu'il y a des effets négatifs dans les traitements sous l'influence des panneaux solaires sur la densité de la prairie, on constate des effets positifs sur la protection de la végétation contre le dessèchement, notamment pendant les saisons du printemps et de l'été. En moyenne sur deux ans, la quantité de végétation sèche est 1.7 fois plus élevée en plein soleil, dans le contrôle, qu'en inter-rangée et sous les panneaux.

---

La présence des panneaux peut ainsi impacter l'état de la prairie de façon négative sur la densité mais de façon positive sur l'assèchement de la végétation. Cependant, la création d'un microclimat contrasté peut aussi impacter l'état et la qualité de la végétation qui y pousse.

---

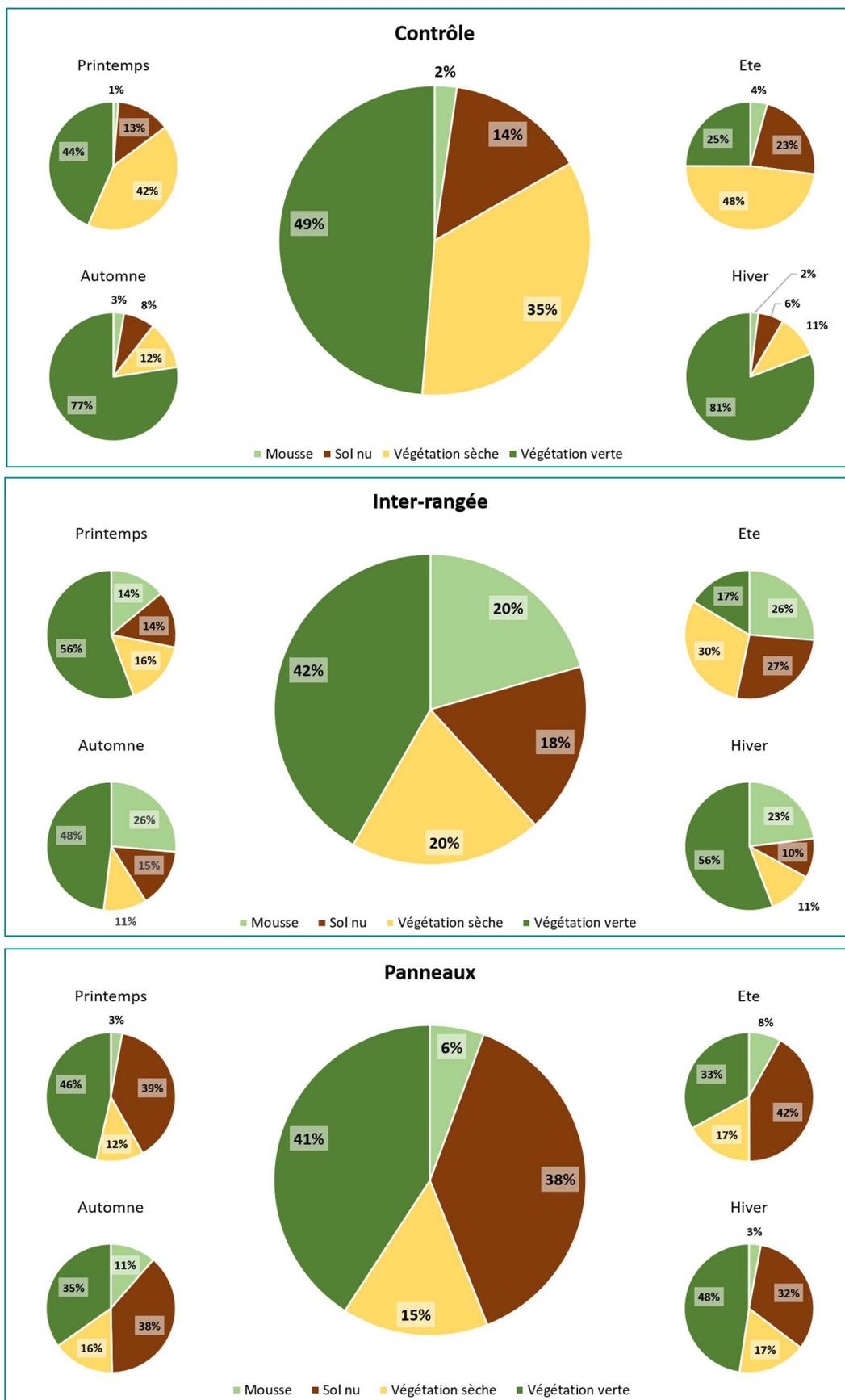


Figure 8 : Diagramme en secteurs de la qualité de la prairie (% sol nu et mousse visible, végétation sèche et verte) par traitement en moyenne annuelle sur deux ans et en fonction des saisons sur le site de Braize.

## 2.1.4 Qualité fourragère de la végétation

### 2.1.4.1 Azote (N)

En moyenne sur deux ans, la teneur en azote totale de la végétation mesurée sous les panneaux est 1.4 fois supérieure à celle des deux autres traitements. Ceci est observé aussi bien en première ou en deuxième année de suivi. De manière saisonnière, le même constat est observé (Figure 98). Néanmoins, la teneur en azote présente une hausse à la fin de l'été jusqu'en automne et redescend au début de l'été suivant. La teneur en azote sous les panneaux semble plus stable que celle des autres traitements.

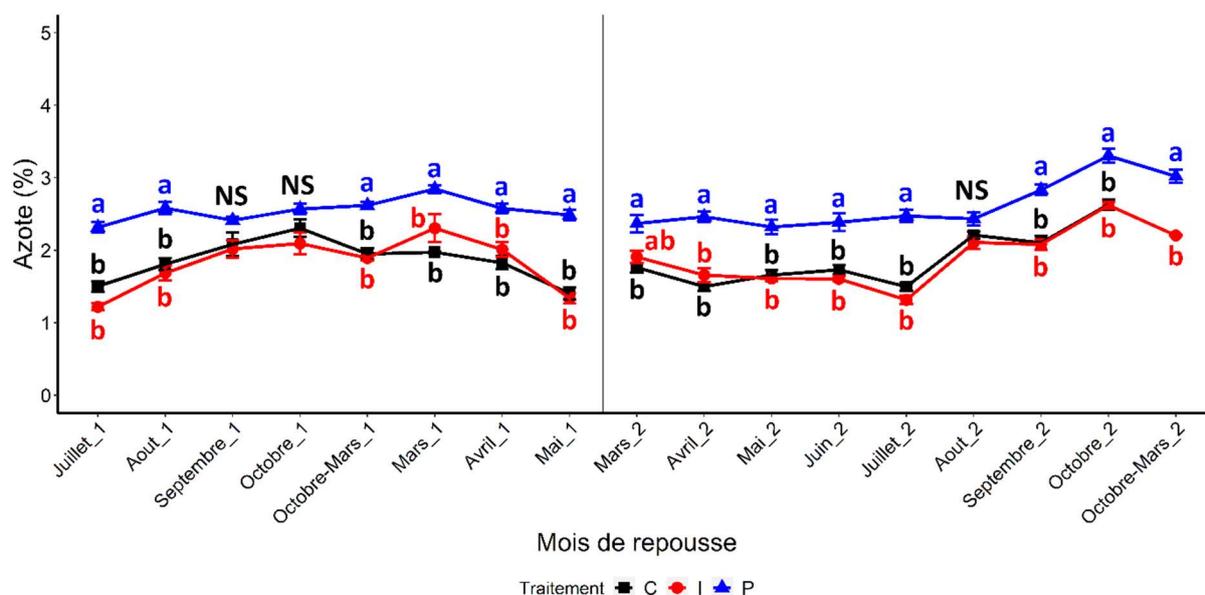


Figure 98 : Dynamique temporelle de la teneur en azote totale de la végétation, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

### 2.1.4.2 NDF : fibres totales (insolubles dans les détergents neutres)

En moyenne sur deux ans, la teneur en fibres totales insolubles de la végétation augmente de 8% et 16% sous les panneaux comparés à l'Inter-rangée et au Contrôle, respectivement. L'Inter-rangée présente aussi un peu plus (7%) de fibres insolubles que le Contrôle. Cela est observé les deux années de suivi. Quelle que soit la saison, la teneur en fibres de la végétation sous les panneaux est toujours supérieure à celle mesurée en Contrôle et semble plus stable dans le temps (Figure 10). Les différences observées entre panneaux et inter-rangée s'observent uniquement au printemps et en été. Néanmoins, dans les trois traitements, la teneur en NDF diminue au début du printemps et à la fin de l'été, pour remonter en début d'hiver et au cours de l'été. D'une année sur l'autre, l'intensité de réponse peut varier notamment en automne et hiver. Alors qu'en première année de suivi, de septembre à début mars, la teneur en NDF ne varie pas entre les traitements, en deuxième année, les mesures en Contrôle et en Inter-rangée est plus basse surtout en octobre.

### 2.1.4.3 Carbone (C)

En moyenne sur deux ans, la teneur en carbone total de la végétation est de 5% supérieure en Inter-rangée et 3% supérieure en Contrôle par rapport à la végétation présente sous les panneaux. Le

Contrôle montre aussi une teneur en carbone légèrement plus élevée que celle en Inter-rangée. Ce constat est visible sur les deux années de suivi. De manière saisonnière, le Contrôle et l'Inter-rangée présentent toujours plus de carbone total que sous les panneaux (Figure 11). La teneur en carbone est uniquement plus faible en Inter-rangée par rapport au Contrôle durant l'hiver. De manière mensuelle, on constate une plus forte variation sous les panneaux avec notamment des chutes de teneur en carbone en octobre de la première année et en mars et juin de la deuxième année de suivi. D'une année sur l'autre, les réponses n'interviennent pas au même période de l'année comme on peut le voir avec les chutes de teneur sous les panneaux.

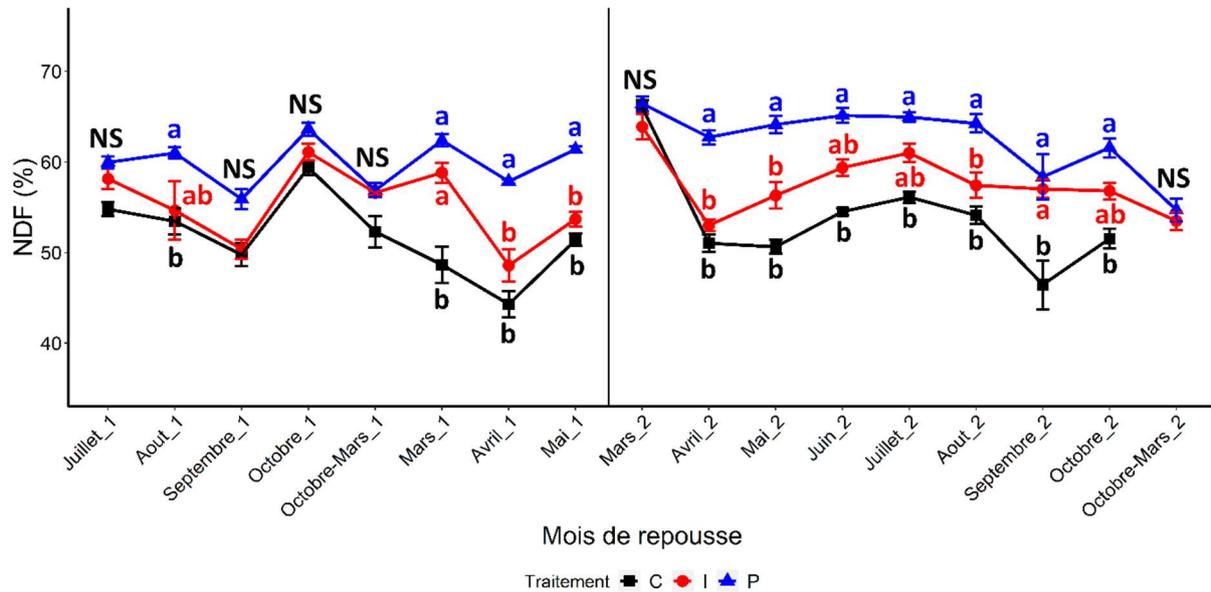


Figure 10 : Dynamique temporelle de la teneur en fibres totales insolubles dans les détergents neutres (NDF), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

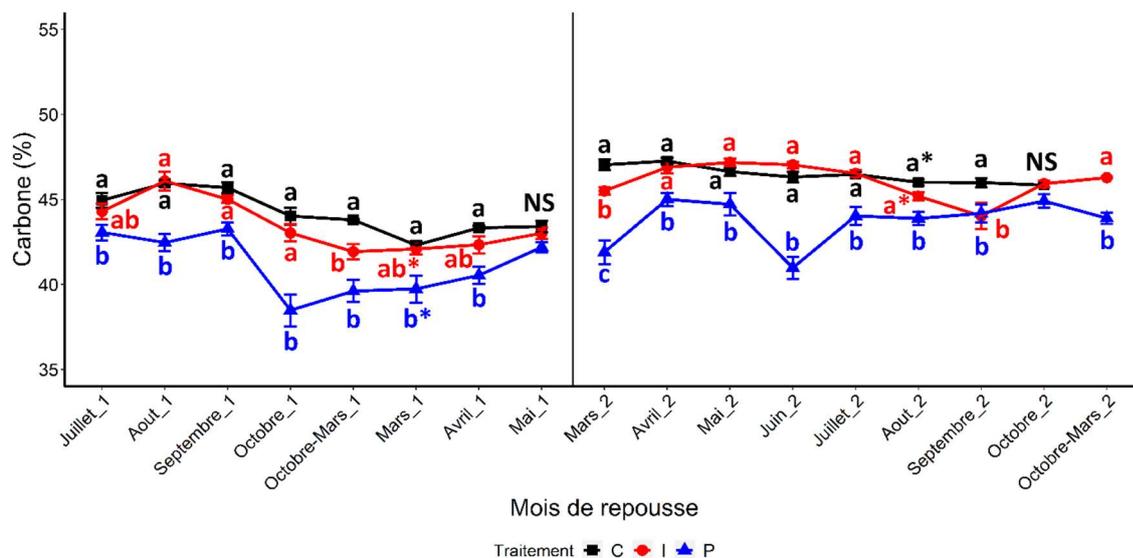


Figure 11 : Dynamique temporelle de la teneur totale en carbone de la végétation, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après un test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Braize, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité fourragère de la végétation diffère nettement entre traitements. La végétation à l'ombre des panneaux présente une teneur en azote 1.4 fois plus élevée et une teneur en fibres insolubles 1.08 à 1.16 fois plus élevée que la végétation en Inter-rangée et en Contrôle. Cette teneur plus élevée en azote peut provenir d'une adaptation physiologique engendrée par l'ombre, en augmentant la teneur en chlorophylle pour limiter les effets de l'ombrage sur la photosynthèse et ainsi optimiser l'interception et l'utilisation du rayonnement. Ce qui permet d'avoir une végétation plus protéinée à l'ombre.

Un fourrage riche en NDF est peu digestible, ce qui pourrait réduire la consommation de la végétation par les ovins. Cependant, la teneur élevée en N contrebalance cette plus faible digestibilité, puisque le ratio NDF/N est 1.2 et 1.3 fois plus faible sous les panneaux qu'en Inter-rangée et Contrôle, respectivement. Ceci signifie que pour une unité d'azote consommée, la quantité de fibre ingérée est plus faible. Ainsi, la végétation à l'ombre des panneaux pourrait être une meilleure source de protéines que la végétation en Inter-rangée ou en Contrôle.

Concernant le carbone total, celui-ci est en moyenne sur deux ans, 1.05 et 1.07 supérieure en Inter-rangée et en Contrôle par rapport à la végétation sous les panneaux. Cependant, le carbone du NDF est intégré dans le carbone total. Ceci signifie qu'il y a plus de carbone qui est alloué aux fibres et donc moins de composés carbonés non structuraux dans la végétation à l'ombre des panneaux tels que l'amidon.

L'ensemble des effets observés pourrait être lié à des phénologies contrastées des plantes avec des états différents entre traitements (stade végétatif, % limbes, stade reproducteur).

Ainsi, la végétation présente au sein du parc agrivoltaïque montre une diversité élevée de qualité fourragère, ce qui pourrait être bénéfique pour les ovins, qui peuvent ainsi moduler leurs choix alimentaires entre une végétation plus protéinée à l'ombre et plus énergétique au soleil.

---

La qualité fourragère de la végétation est donc diversifiée au sein du parc agrivoltaïque. Cependant, en plus des effets du microclimat, les différences peuvent être dues à une modification des espèces ainsi que des stades phénologiques entre traitements.

---

## 2.1.5 Composition botanique des communautés végétales

### 2.1.5.1 Indices de dissimilarité

Pour savoir si les communautés végétales se distinguent les unes des autres en fonction des traitements, des indices de dissimilarités [3] ont été calculés sur les cinq relevés botaniques effectués sur deux ans, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>). L'indice de dissimilarité de Sorensen [4] indique qu'il y a plus de différence entre les traitements qu'à l'intérieur d'un même traitement (Figure 12). L'Inter-rangée et le Contrôle présentent notamment légèrement plus de dissimilarités avec le Panneaux ( $IP_{SOR} = 0.63$  ;  $CP_{SOR} = 0.62$ ) qu'entre eux ( $CI_{SOR} = 0.58$ ).

Cet indice de dissimilarité peut être décomposé en deux composantes : la nestedness, c'est-à-dire la perte ou le gain en espèce et le turn-over, c'est-à-dire le changement d'espèces. La composante nestedness ne représente qu'une faible part de la dissimilarité de l'ordre de 15 %. Néanmoins, cette composante montre qu'entre traitements, il y a légèrement plus de variation du nombre d'espèces

entre le Contrôle et le Panneaux ( $CP\beta_{SNE} = 0.09$ ) qu'avec l'Inter-rangée ( $CI\beta_{SIM} = 0.06$ ,  $IP\beta_{SIM} = 0.05$ ) (Figure 13). Ce qui se retrouve aussi en regardant la richesse spécifique, en effet, en moyenne sur deux ans, à l'échelle de la sonde ( $0.5m^2$ ), la richesse spécifique en Contrôle ( $10.51$  espèces/ $0.5m^2$ ) est deux espèces plus élevées que la richesse spécifique sous les panneaux ( $8.36$  espèces/ $0.5m^2$ ). L'Inter-rangée se retrouve intermédiaire avec  $9.69$  espèces/ $0.5m^2$ .

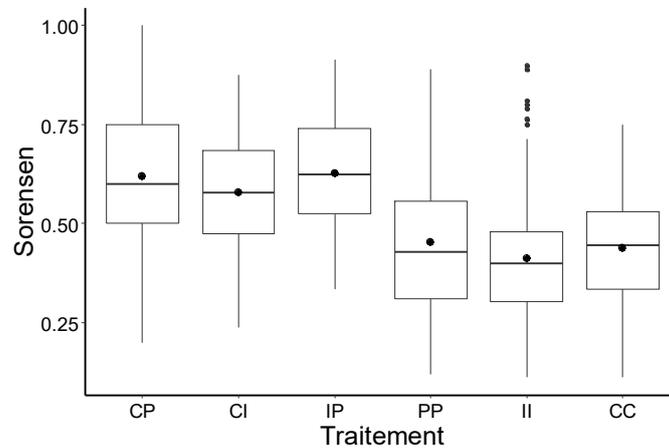


Figure 12 : Diagramme en boîte de l'indice de dissimilarité de Sorensen, sur le site de Braize, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

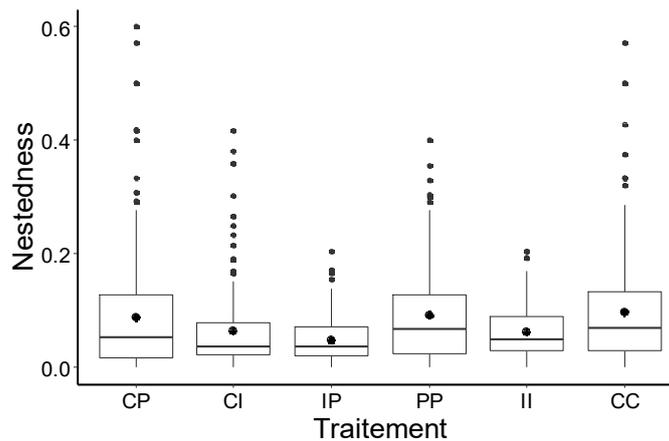


Figure 13 : Diagramme en boîte de la composante Nestedness, sur le site de Braize, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

Cependant, la majeure partie de la dissimilarité provient de la composante turn-over qui représente 85% de la dissimilarité entre les traitements. C'est-à-dire que la différence entre les traitements ne provient pas majoritairement d'une modification de la richesse spécifique, mais surtout d'un changement d'espèces. Les indices au sein d'un même traitement sont inférieurs mais proches des indices inter-traitement, ce qui signifie qu'il y a une hétérogénéité spatiale au sein de chaque traitement, ce qui est attendu en prairie. Néanmoins, l'indice de turn-over indique qu'il y a plus de différence entre les traitements qu'à l'intérieur d'un même traitement (Figure 14), ce qui montre que les différents traitements se démarquent bien entre eux, en ayant plus d'espèces différentes que d'espèces semblables. De plus, l'Inter-rangée présente plus d'espèces différentes avec le Panneaux ( $IP\beta_{SIM} = 0.58$ ) que I et P avec le Contrôle ( $CI\beta_{SIM} = 0.52$  ;  $CP\beta_{SIM} = 0.53$ ).

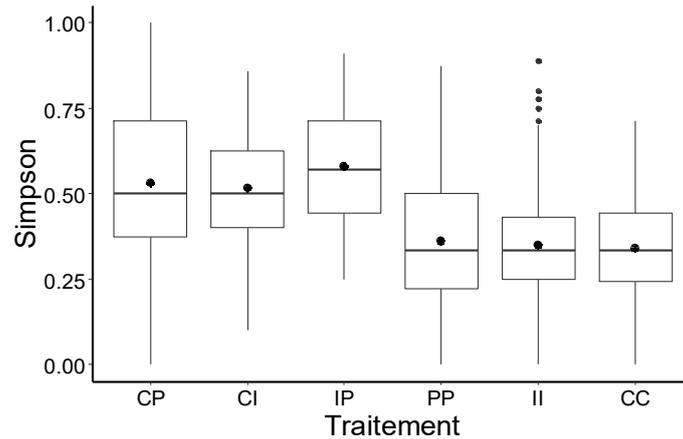


Figure 14 : Diagramme en boîte de la composante Turn-over avec l'indice de Simpson, sur le site de Braize, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

### 2.1.5.2 Comparaison des communautés végétales

Sur 60 espèces en tout retrouvées sur deux ans au sein des quadrats suivis, 43 se retrouvent en Contrôle, 39 en Inter-rangée et 44 sous panneaux. Uniquement un tiers des espèces est présent simultanément dans les trois traitements (Figure 15). Parmi les traitements, le Panneaux comptabilise le plus d'espèces exclusives (9 espèces). Peu d'espèces sont spécifiques au traitement Inter-rangée (3 espèces).

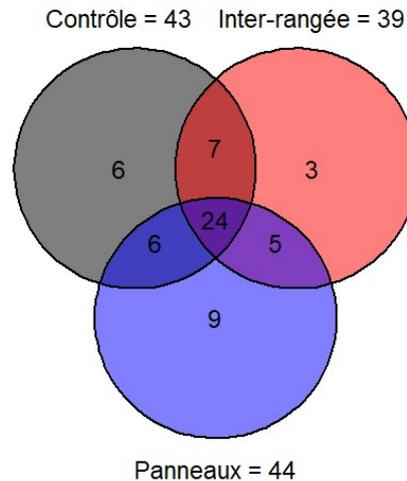


Figure 15 : Diagramme de Venn prenant en compte les 60 espèces présentes sur cinq relevés botaniques effectués sur le site de Braize.

Pour visualiser la dissimilarité de la composition floristique entre traitement, une analyse en composantes principales (PCA) a été effectuée, dont les deux premiers axes représentent 12.34% de la variance totale, en prenant en compte les relevés botaniques sur 2 ans, à l'échelle de la sonde. Pour distinguer au mieux la différence qu'il peut y avoir entre les traitements, une BGA (Between Group Analysis) a été réalisée puis validée par un test de permutation et de « Cross-validation » avec une procédure « leave-one-out » [5]. Les résultats du test confirment la robustesse et la significativité de la représentation qui dissocient les différents traitements. Ainsi, comme représenté dans la figure 16 et calculé précédemment par l'indice de dissimilarité, les différents traitements se distinguent les uns des autres par leur communauté végétale.

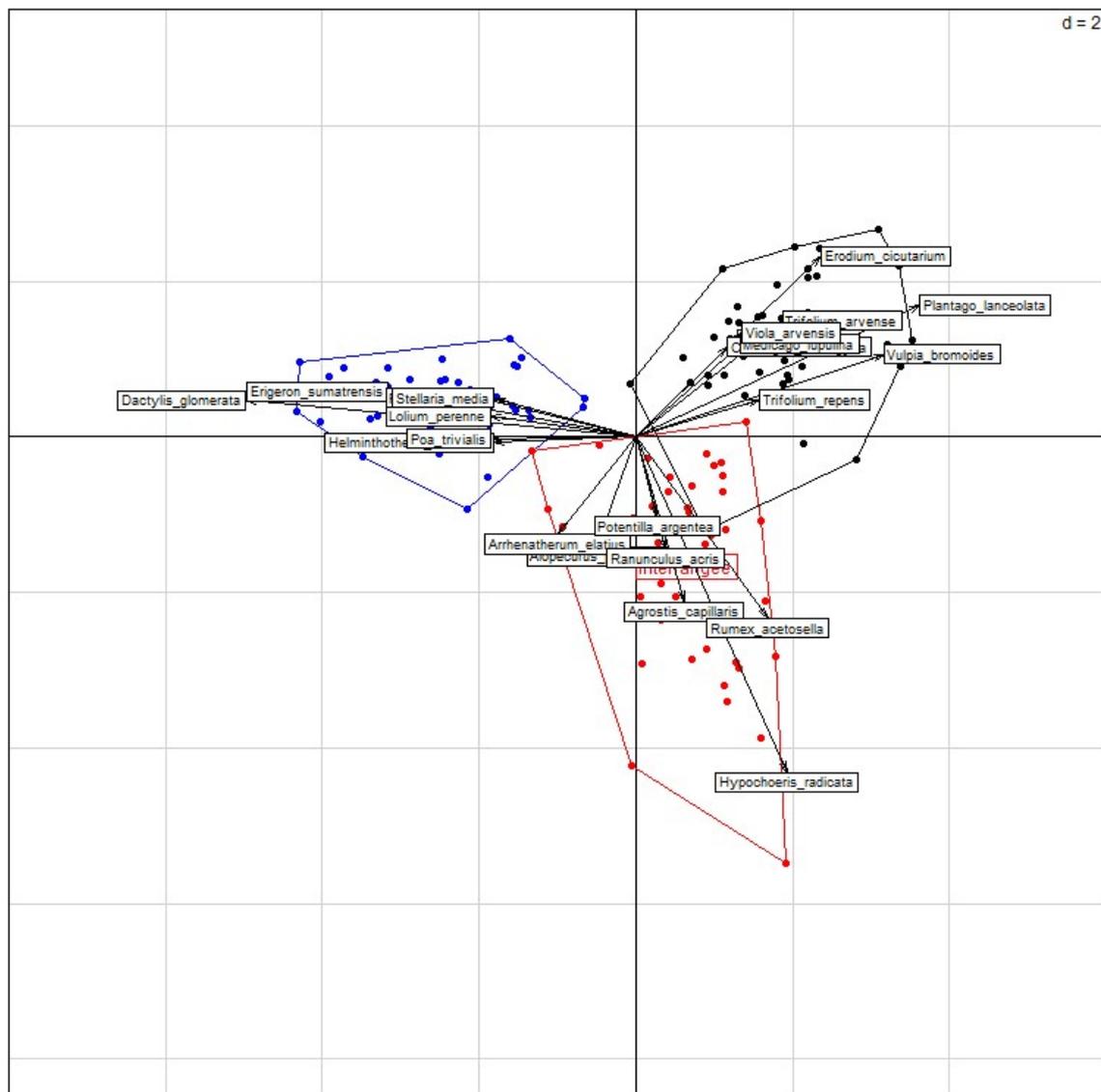


Figure 16 : Graphique de la Between Group Analysis (BGA) effectuée sur une analyse en composantes principales ayant les deux premiers axes portant 12.34% de la variance totale. Les données botaniques proviennent de cinq relevés à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>) sur le site de Braize. Les espèces ont une contribution à l'axe 1 et 2 supérieures à la moyenne. Légende : Noir = Contrôle ; Rouge = Inter-rangée ; Bleu = Panneaux

Chaque traitement présente des espèces discriminantes, c'est-à-dire qu'elles participent le plus à la différenciation des traitements. Ces espèces sont représentées sur le graphique et listées dans le tableau 2 en présentant leur recouvrement moyen sur deux ans. On remarque que *Dactylis glomerata* est l'espèce la plus discriminante sous les panneaux, c'est une espèce qui s'accommode de l'ombrage et présente une bonne valeur fourragère, cependant, elle peut devenir dominante (Simpson = 0.69) dans les situations sèches [1], ce qui est le cas sur le site de Braize où le sol est sableux et l'espèce présente le plus grand recouvrement. L'espèce la plus discriminante en Inter-rangée est *Hypochaeris radicata*, c'est une espèce commune dans les milieux secs et peut abonder dans les prairies surpâturées ou présentant des trous dans le couvert prairial [1]. En Contrôle, c'est *Plantago lanceolata* qui est l'espèce la plus discriminante, cependant, cette espèce a une forte amplitude écologique et qui peut présenter un intérêt fourrager, mais elle est signe d'une dégradation de la prairie et d'une forte perte de potentiel de production si son abondance dépasse 5 à 10% [1] ce qui est largement le cas. Cependant, ces espèces les plus discriminantes en Inter-rangée et Contrôle, ne sont pas celles qui ont le plus fort recouvrement. En effet, dans ces traitements, il s'agit de *Vulpia bromoides*. Cette espèce annuelle, de la famille des Poacées, est exclusive au sol sec, sableux et rocailleux avec un intérêt fourrager très faible à nul du fait de sa production de limbes quasi inexistantes [1]. La vulpie est

notamment plus dominante en Contrôle (Simpson = 0.65) qu'en Inter-rangée (Simpson = 0.80), où dans ce dernier traitement, la diversité spécifique semble le plus équitable. Dans la liste des espèces discriminantes, une seule poacée (famille dominante en prairie) est discriminante pour le Contrôle contre trois en Inter-rangée et quatre en Panneaux. A l'inverse, le Contrôle est le seul traitement à avoir des Fabacées comme espèce discriminante.

Tableau 2 : Pourcentage de recouvrement moyen sur cinq relevés floristiques sur le site de Braize pour les espèces ayant une contribution aux axes 1 et 2 de la BGA supérieures à la moyenne. Une case grisée indique que l'espèce est discriminante du traitement.

Traitement	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
<i>Agrostis capillaris</i>	0.06	2.05	0.00
<i>Alopecurus pratensis</i>	0.02	1.55	0.89
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0.38	3.23	2.87
<i>Crataegus monogyna</i>	0.79	0.00	0.00
<i>Dactylis glomerata</i>	7.44	14.00	43.61
<i>Erigeron sumatrensis</i>	0.78	1.34	6.88
<i>Erodium cicutarium</i>	2.34	0.01	0
<i>Helminthotheca echioides</i>	0.63	2.08	5.32
<i>Hypochaeris radicata</i>	3.46	16.47	0.73
<i>Lolium perenne</i>	0.2	0.36	1.41
<i>Medicago lupulina</i>	0.23	0.01	0.00
<i>Plantago lanceolata</i>	16.91	6.15	0.54
<i>Poa pratensis</i>	0.01	0.06	2.67
<i>Poa trivialis</i>	0	0.78	2.75
<i>Potentilla argentea</i>	0.00	0.23	0.00
<i>Ranunculus acris</i>	0.00	0.24	0.00
<i>Rumex acetosella</i>	4.23	9.1	1.45
<i>Stellaria media</i>	0.01	0	1.7
<i>Trifolium arvense</i>	1.45	0.3	0.15
<i>Trifolium repens</i>	4.24	2.73	1.38
<i>Viola arvensis</i>	0.54	0.00	0.00
<i>Vulpia bromoides</i>	46.80	29.77	16.24

Sur deux ans avec cinq relevés, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>), les Poacées montrent une espèce de plus sous les Panneaux et en l'Inter-rangée que sous le Contrôle (I = 3.2, P = 3, C = 2.3). Le recouvrement des Poacées est aussi 1.3 fois plus élevé sous les Panneaux (P = 71.09 %, I = 52.71 % ; C = 55.35 %). Pour les Fabacées, le Contrôle présente une à deux espèces en plus (I = 0.9, P = 0.4, C = 1.9) et un recouvrement 2 à 5 fois plus important (C = 7.82 %, I = 3.95 %, P = 1.58 %). En ce qui concerne les espèces diverses autres que les Fabacées et Poacées, il y a une espèce en moins sous les Panneaux (C = 6.29 ; I = 5.6 ; P = 4.93) et un recouvrement 1.2 à 1.6 fois plus important en Inter-rangée (I = 43.35 %, C = 36.83 %, P = 27.31 %).

Sur le site de Braize, les communautés végétales de chaque traitement se distinguent les unes des autres essentiellement par une modification des espèces et non par un changement du nombre d'espèces bien qu'il y ait deux espèces en moins sous les panneaux. Effectivement, uniquement un tiers des espèces rencontrées est simultanément dans les trois traitements et le Panneaux présente le plus d'espèces exclusives. L'inter-rangée qui présente le moins d'espèces exclusives montre une plus forte équitabilité du recouvrement des espèces alors que sous les panneaux ou en plein soleil en Contrôle, une espèce de la famille des Poacées domine plus que les autres. L'espèce qui définit le mieux la communauté à l'ombre des panneaux est le *Dactylis glomerata*. Elle présente une bonne valeur fourragère à l'inverse des espèces discriminantes et dominantes en Inter-rangée et Contrôle qui sont des espèces plutôt de milieux secs et avec un faible intérêt fourrager. Ainsi, la communauté végétale présente sous panneaux peut expliquer que la biomasse produite soit plus importante et de meilleure qualité. De plus, un fait marquant induit notamment par la forte réduction de rayonnement est la réduction en nombre et en recouvrement des espèces de la famille des Fabacées, fixatrices d'azote atmosphérique, qui sont 2 à 5 fois moins présentes en Inter-rangée et sous les panneaux par rapport à la zone en plein soleil.

La présence de panneaux solaires a modifié assez rapidement (moins de 5 ans) la composition botanique sur le site. Ceci induit des modifications sur la production de biomasse mais aussi sur sa qualité. Néanmoins, certaines espèces sont présentes dans les trois traitements ce qui peut nécessiter une adaptation physiologique (plasticité phénotypique) aux différentes conditions.

## 2.1.6 Morphologie des feuilles

### 2.1.6.1 Surface foliaire spécifique (SLA)

La surface foliaire spécifique pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 67% et 57% plus grande pour la végétation sous les panneaux que celle en Inter-rangée et en Contrôle, respectivement (Tableau 3).

Tableau 3 : Moyenne pondérée de la SLA, LDMC et de la densité des stomates par le pourcentage de recouvrement en moyenne sur cinq relevés des espèces échantillonnées présentes dans les trois traitements simultanément sur Braize.

Traitement	Recouvrement (%)	SLA pondérée (cm <sup>2</sup> /g)	LDMC pondérée (g/g)	Densité stomatique pondérée (nb mm <sup>-2</sup> )
Contrôle	88.20	136.45	0.248	98.45
Inter-rangée	87.44	145.26	0.328	95.98
Panneaux	79.10	227.84	0.199	79.20

### 2.1.6.2 Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)

La teneur en matière sèche des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 25% et 65% plus importante en Contrôle et en Inter-rangée, respectivement, par rapport à celle de la végétation sous les panneaux (Tableau 3). La LDMC en Inter-rangée est aussi 32% plus importante qu'en Contrôle.

### 2.1.6.3 Densité stomatique

La densité des stomates des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 21 et 24% plus importante en Contrôle et en Inter-rangée, respectivement, par rapport aux feuilles de la végétation sous les panneaux (Tableau 3).

Sur le site de Braize, en comparant les mêmes espèces dans chaque traitement, une plasticité morphologique est observée entre les traitements. La surface foliaire spécifique (SLA) est 1.6 et 1.7 fois plus grande et la teneur en matière sèche (LMDC) est 1.7 et 1.3 fois plus petite à l'ombre sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée et au Contrôle. Ceci signifie que pour un même poids, les feuilles sont plus grandes et plus fines sous les panneaux. Ce qui est en cohérence avec la relation biomasse~croissance en hauteur entre la végétation sous les panneaux et celle en Contrôle. Il y a donc un étiolement (croissance en hauteur) et une augmentation de l'efficacité d'interception de la lumière avec l'ombre.

En Inter-rangée, bien que la végétation ait la même croissance en hauteur et que la SLA est la même que le Contrôle, la relation est nettement différente. Ce changement phénotypique d'une teneur en matière sèche supérieure n'explique pas cette différence de relation. Au contraire, avec une teneur en matière sèche supérieure pour une même surface de feuille ainsi qu'une même hauteur échantillonnée, la biomasse récupérée devrait être plus importante. Ce qui n'est pas le cas à cause d'une densité végétale réduite en Inter-rangée. La variabilité spatiale du rayonnement en inter-rangée a créé des patches de lumière plus contrastés en inter-rang qui a pu engendrer des variations plus importantes de LDMC.

Concernant la densité stomatique, plus elle est importante et plus la végétation peut effectuer d'échanges gazeux avec l'environnement, ce qui implique une meilleure photosynthèse et une plus grande transpiration. Or, les feuilles à l'ombre des panneaux possèdent moins de stomates ce qui explique la limitation de production de biomasse pendant la saison de pleine croissance, mais aussi que cette production limitée est moins impactée par l'apparition des conditions estivales en optimisant l'eau du sol.

Braize automne 2022

©Loan Madej



## 2.2 PARTIE 2 – MARMANHAC

### 2.2.1 Variables environnementales

#### 2.2.1.1 Météorologie

Tableau 4 : Données météorologiques des capteurs aériens sur le site de Marmanhac, moyenne par mois de repousse de la végétation et moyenne annuelle.

Marmanhac			Nombre de jour gapfillé				Rayonnement journalier (PAR - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			Cumul de précipitations (mm)			Humidité relative (%)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Depuis 2020 aérien	Depuis 2020 sonde	BF5	Depuis 2022	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Nombre de jour avec pluie	Contrôle	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Juillet	1	30	0	0	13	30	574.60	446.76	30.31	8 (27%)	49.06	3.31	67.86	68.34	69.19
Aout	1	32	0	0	14	32	530.17	390.39	31.52	13 (41%)	47.72	4.97	61.36	63.00	62.88
Septembre	1	35	0	0	11	35	349.89	231.70	22.08	17 (49%)	145.71	8.09	71.64	72.75	73.19
Octobre	1	23	1	1	17	23	161.63	103.32	14.27	23 (100%)	195.12	15.50	88.20	87.63	88.89
Octobre-Mars	1	132	1	1	77	132	112.00	73.48	11.32	88 (67%)	689.46	55.55	83.76	83.72	84.64
Mars	1	30	0	0	13	30	328.23	183.30	21.61	17 (57%)	68.43	2.63	72.38	73.98	74.08
Avril	1	35	0	0	25	35	389.82	267.99	23.01	17 (49%)	111.03	5.52	67.52	69.96	69.64
Mai	1	27	0	0	0	27	382.50	279.07	30.81	20 (74%)	141.07	7.81	76.82	76.87	78.02
2020-2021		344	2	2	170	344	353.61	247.00	23.12	203 (59%)	1447.58	103.37	73.69	74.53	75.07
Interruption		287	116	116	207	287	231.57	173.87	20.46	214 (75%)	1010.45	71.56	78.45	79.06	79.62
Mars	2	25	0	0	25	25	290.29	181.92	23.86	11 (44%)	75.80	3.33	70.20	72.03	71.89
Avril	2	30	0	0	30	30	397.77	288.28	25.87	11 (37%)	61.98	2.05	71.01	72.12	72.62
Mai	2	27	18	18	27	27	464.15	366.14	35.96	25 (93%)	50.33	2.42	68.30	69.74	69.88
Juin	2	29	0	0	29	0	493.82	403.63	29.28	17 (59%)	100.49	2.62	69.62	69.69	70.52
Juillet	2	34	0	0	34	0	550.22	444.69	26.59	2 (6%)	1.46	0.00	53.62	54.49	54.66
Aout	2	27	0	0	27	0	408.67	233.91	22.57	14 (52%)	65.58	16.05	65.55	66.12	66.47
Septembre	2	30	5	9	30	5	289.58	102.36	17.09	16 (53%)	80.77	1.94	76.81	77.05	77.81
Octobre	2	30	8	28	30	8	179.05	61.74	13.31	11 (37%)	61.95	2.01	75.33	75.36	75.57
Octobre-Mars	2	124	0	0	124	0	128.85	28.55	9.15	79 (64%)	383.35	13.87	85.10	83.57	84.14
2022		356	31	55	356	95	355.82	234.58	22.63	186 (52%)	881.71	44.29	70.62	71.13	71.51

Marmanhac			Température journalière de l'air (°C)			Ecart journalier moyen (°C ; Max-Min)			Moyenne Maximum   Minimum (°C)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Juillet	1	30	18.09	17.96	18.14						
Aout	1	32	20.54	20.43	20.50						
Septembre	1	35	15.42	15.26	15.44						
Octobre	1	23	8.38	8.34	8.46						
Octobre-Mars	1	132	4.78	4.73	4.89						
Mars	1	30	6.33	6.26	6.49						
Avril	1	35	7.34	7.29	7.43						
Mai	1	27	11.05	10.97	11.12						
2020-2021		344	11.49	11.41	11.56						
Interruption		287	10.48	10.39	10.60						
Mars	2	25	6.82	6.77	6.95						
Avril	2	30	11.79	11.68	11.88						
Mai	2	27	15.71	15.53	15.80						
Juin	2	29	18.85	18.70	18.95	14.38	13.95	13.78	26.7   12.32	25.95   12	26.28   12.51
Juillet	2	34	22.08	21.92	21.97	17.93	17.61	17.52	31.47   13.54	30.64   13.03	31.15   13.62
Aout	2	27	20.22	20.02	20.19	15.33	14.67	15.53	29.21   13.88	28.18   13.51	29.55   14.02
Septembre	2	30	13.67	13.42	13.72	13.40	12.68	13.91	18.08   6.91	17.22   6.65	18.67   7.07
Octobre	2	30	14.37	14.29	14.51	8.82	8.57	9.38	14.96   8.49	14.66   8.38	15.46   8.59
Octobre-Mars	2	124	3.98	3.92	4.18	7.56	8.07	8.78	8.12   0.56	8.28   0.21	9.13   0.35
2022		356	14.17	14.03	14.24	12.90	12.59	13.15	21.42   9.28	20.82   8.96	21.71   9.36

En moyenne annuelle, le rayonnement journalier moyen est sensiblement le même en première ou deuxième année de suivi pour chaque traitement (Tableau 4). La réduction de rayonnement sous les panneaux est de 94% par rapport au contrôle en moyenne annuelle. De façon mensuelle, cela varie de 95% en été à 90% en hiver. Le rayonnement diffus sous panneaux représente 68 % du rayonnement total contre 46 % en plein soleil. L'inter-rangée quant à elle montre une réduction en moyenne annuelle de 30-34%. Toutefois, cette réduction dépend de la position dans l'inter-rangée, effectivement, en étant proche du bord haut d'une table de panneaux (Figure 17 ; Inter-rangée 1), la réduction est de 60%, au milieu de l'inter-rangée (Inter-rangée 2), elle est de 23%, alors que proche du bord bas d'une table (Inter-rangée 3), elle est de 14%. Néanmoins, cette réduction n'est pas stable au

cours de l'année. Effectivement, la réduction de rayonnement peut aller jusqu'à 78% en hiver comme durant la période Octobre-Mars 2022. Cet écart se minimise durant les périodes plus ensoleillées comme en Juin 2022 avec une réduction uniquement de 18%. En effet, l'ombrage engendré en inter-rangée est variable entre les saisons. En hiver, l'inter-rangée est quasi totalement à l'ombre, alors qu'en été, elle est la plus ensoleillée, avec juste la végétation proche du haut des panneaux qui est à l'ombre. Comme il n'y avait pas de capteurs aériens en Inter-rangée la première année, les données manquantes ont été gapfillées. Néanmoins, le ratio ne change pas comme en deuxième année ce qui indique que le gapfilling est plus efficace pour estimer en moyenne annuelle plutôt que les variations saisonnières. De plus, par problème d'approvisionnement, les capteurs installés en 2022 en Inter-rangée ne sont pas du même fabricant ce qui engendre une différence de sensibilité bien qu'une calibration entre les deux types de capteurs ait été faite.

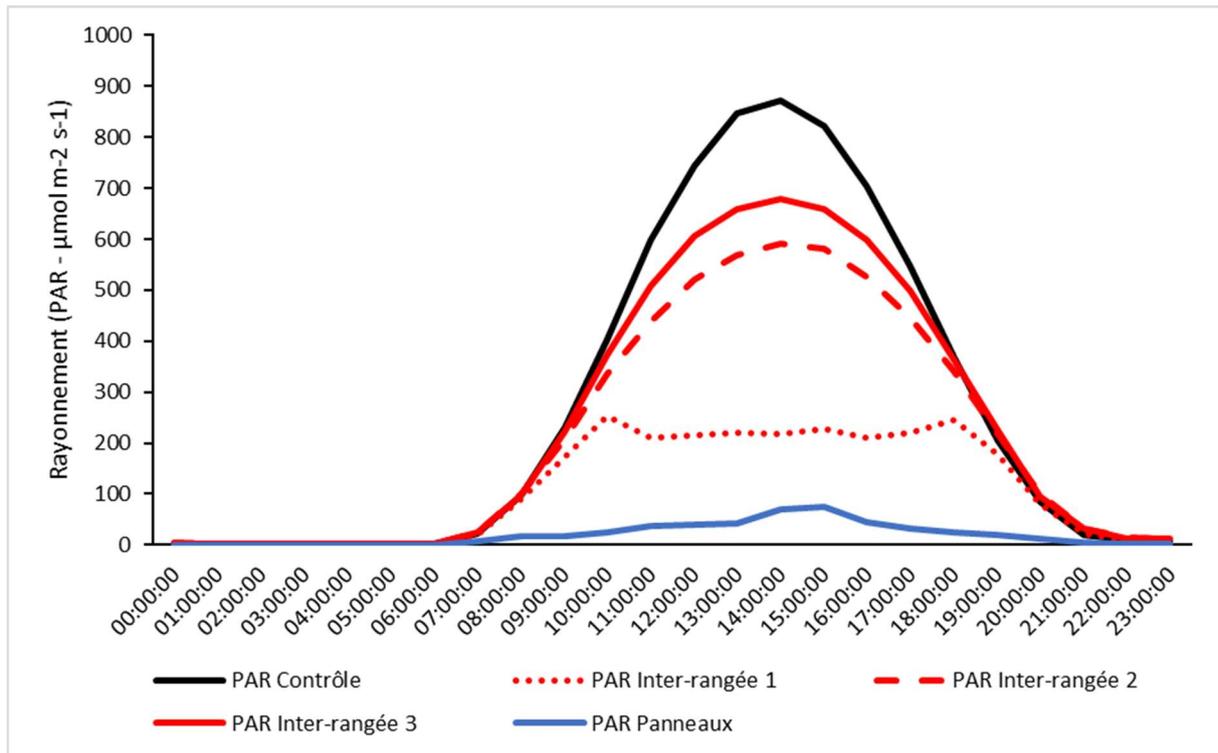


Figure 17 : Dynamique journalière du rayonnement entre les traitements en moyenne sur deux ans sur Marmanhac. Légende : bleu : Panneaux ; noir : Contrôle ; rouge : Inter-rangée ; 1 : proche haut panneau, 2 : milieu de l'inter-rangée, 3 : proche bas panneau

Les précipitations ont été 1.6 fois plus importantes en année 2020-2021 qu'en année de suivi 2022 sachant que le mois de Juin 2022 est pris en compte alors qu'il n'a pas été suivi en 2020/2021, ce qui sous-estime la différence. Cependant, on remarque qu'il y a proportionnellement le même nombre de jours avec précipitation, 52% des jours en 2022 contre 59% du temps en 2020/2021. Ceci provient essentiellement du gapfilling à l'échelle journalière qui est compliqué pour les précipitations et qui se voit notamment en mai 2022. Néanmoins, on constate que ces faibles précipitations à l'échelle du mois sont cohérentes avec une diminution de l'humidité de l'air en contrôle. Entre la première année et la deuxième année, le cumul en contrôle a été plus faible pour chaque période sauf en Mars (+7.4mm) et Août (+17.9mm), où il a plu légèrement plus lors de la deuxième année. Le mois de Juillet 2022 a été particulièrement sec en ne présentant quasiment aucune précipitation. Les précipitations sont fortement réduites sous les panneaux, effectivement, les panneaux laissent passer la pluie uniquement du côté le plus haut quand les précipitations tombent avec le bon angle. De plus, les interstices qui séparent chaque panneau permettent de laisser passer des précipitations en goutte à goutte mais une grande partie de l'eau ruisselle sur les panneaux pour tomber du côté le plus bas. La quantité de précipitations captée par le pluviomètre dépend surtout de sa position sous les panneaux.

Les températures journalières moyennes ont été plus élevées en moyenne annuelle sur la deuxième

année de suivi de 2.7°C par rapport à la première année. Il a notamment fait 6°C de plus en moyenne journalière sur le mois d'octobre 2022, +4.5°C en avril et mai 2022 et +4°C en juillet 2022. Ces mois plus chauds sont notamment en corrélation avec une forte diminution des précipitations. Entre les deux années, le nombre de jours où la température moyenne est en dessous de 0°C est similaire pour un même traitement. Cependant, le gapfilling concernant la température montre des faiblesses pour les températures négatives, ainsi la comparaison n'est pas forcément fiable d'un point de vue journalier. Ainsi, en regardant uniquement 2022 sans gapfilling, on remarque qu'il y a trois jours de moins sous les panneaux où la température moyenne journalière est négative. En regardant l'écart de température moyen journalier, il semble présenter légèrement moins d'écart entre le minimum et le maximum par journée en Inter-rangée, bien que cette différence reste inférieure à 1°C en moyenne. Néanmoins, la différence d'écart entre traitements augmente surtout pendant la période hivernale avec un écart supérieur de 1°C en moyenne sur la période de Octobre à Mars sous les panneaux. L'écart est notamment expliqué par des températures maximales plus chaudes sous les panneaux notamment en période automnale et hivernale et légèrement plus fraîche en début d'été. C'est l'inverse concernant les températures minimales.

Sur le site de Marmanhac, la quantité perçue de rayonnement est similaire entre les deux années. La végétation à l'ombre des panneaux reçoit 93% de rayonnement en moins de façon stable au cours de l'année. En Inter-rangée, le rayonnement est en moyenne réduit de 32% mais cette réduction varie énormément en fonction des saisons en lien avec l'inclinaison du soleil.

Les précipitations, en deuxième année, sont 1.6 fois plus faibles. La quantité de précipitations varie énormément entre le Contrôle et le Panneaux qui ne laisse passer qu'une petite partie des pluies.

Les températures journalières moyennes ont été plus élevées sur la deuxième année de suivi de 2.7°C par rapport à la première année. Il a notamment fait 6°C de plus sur le mois d'octobre 2022, +4.5°C en avril et mai 2022 et +4°C en juillet 2022. Ces mois plus chauds sont notamment en corrélation avec une forte diminution des précipitations. Entre les deux années, le nombre de jours où la température moyenne est en dessous de 0°C est similaire pour un même traitement. Cependant, le gapfilling concernant la température montre des faiblesses pour les températures négatives, ainsi la comparaison n'est pas forcément fiable d'un point de vue journalier. En regardant uniquement 2022 sans gapfilling, on remarque qu'il y a trois jours de moins sous les panneaux où la température moyenne journalière est négative. La température journalière semble présenter légèrement moins d'écart entre le minimum et le maximum par journée en Inter-rangée, bien que cette différence reste inférieure à 1°C en moyenne. Néanmoins, la différence d'écart entre traitements augmente surtout pendant la période hivernale avec un écart supérieur de 1°C en moyenne sur la période de Octobre à Mars sous les panneaux.

### 2.2.1.2 Humidité du sol

En moyenne sur deux ans, l'humidité du sol est similaire entre les traitements sur Marmanhac. C'est le même constat à l'échelle de la première ou de la deuxième année de suivi. Mais à l'échelle du mois, des différences sont mesurées durant les mois estivaux (Figure 18). Effectivement, l'humidité du sol en inter-rangée et sous les panneaux est respectivement 2 et 2.7 fois plus élevée que celle du sol en

contrôle durant le mois d'août de la première année de suivi. Au cours de la deuxième année de suivi, les différences se constatent dès juillet, avec une humidité sous les panneaux 2.1 fois plus élevée que celle du contrôle. L'inter-rangée se situe entre les deux autres traitements.

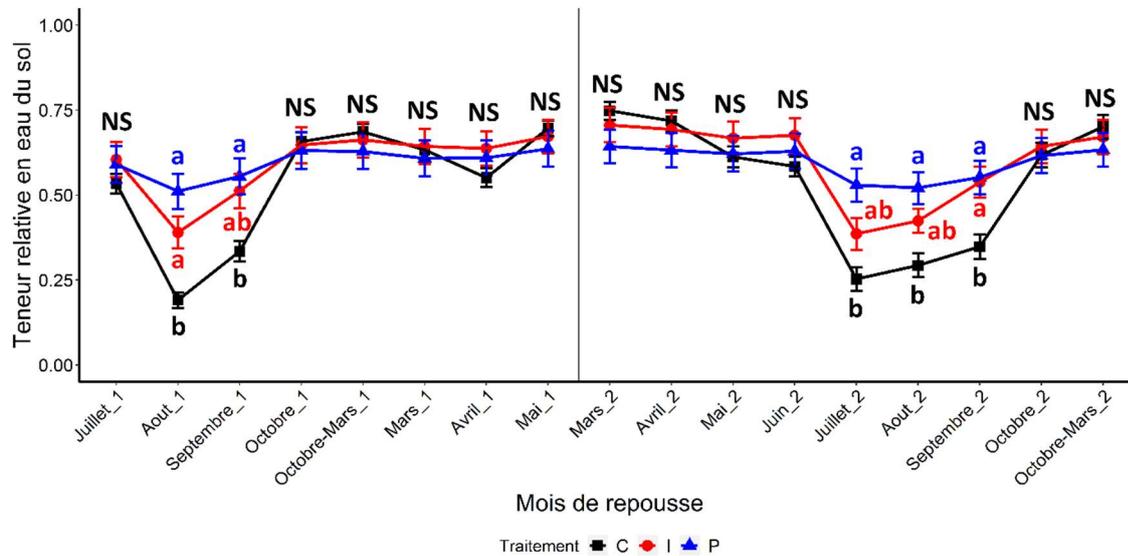


Figure 18 : Dynamique temporelle de la teneur en eau relative du sol, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), l'humidité du sol est similaire entre les traitements. Cependant, de façon périodique durant les mois estivaux, le sol du Contrôle, en plein soleil, peut aller jusqu'à s'assécher 2.1 à 2.7 fois plus que sous les panneaux, à l'ombre, en fonction de l'année. De plus, d'une année sur l'autre, le mois le plus sec varie en fonction des conditions météorologiques. Néanmoins, sous les panneaux, l'humidité du sol reste relativement stable au cours des années. Le sol en inter-rangée s'assèche moins et reste plus ou moins proche de l'humidité mesurée sous les panneaux. Ceci est dû à l'andosol riche en matières organiques qui possède une bonne capacité de rétention en eau. De plus, la pente sur le site permet un transfert horizontal de l'eau vers le sol sous les panneaux recevant peu de pluie.

### 2.2.1.3 Température du sol

En moyenne sur deux ans, la température du sol est de 1.8°C et 2.4°C plus élevée en Contrôle qu'en Inter-rangée et sous les panneaux respectivement. Ce constat est observable au cours des deux années de suivi. Cependant, de légères variations saisonnières sont observées. En automne et en hiver, le Contrôle présente une température plus élevée, tandis que la température du sol en Inter-rangée et sous les panneaux est similaire (Figure 19). En été et au printemps, bien que la température en Contrôle reste plus élevée, celle en Inter-rangée est plus élevée que sous les panneaux. L'écart peut atteindre 4.3°C et 3.9°C de différence entre le Contrôle et les panneaux en juillet de la première et de la deuxième année de suivi respectivement. En ce qui concerne l'Inter-rangée, elle peut présenter une différence de 2.7°C et 1.8°C par rapport au sol sous les panneaux en juillet de la première année et en juin de la deuxième année respectivement.

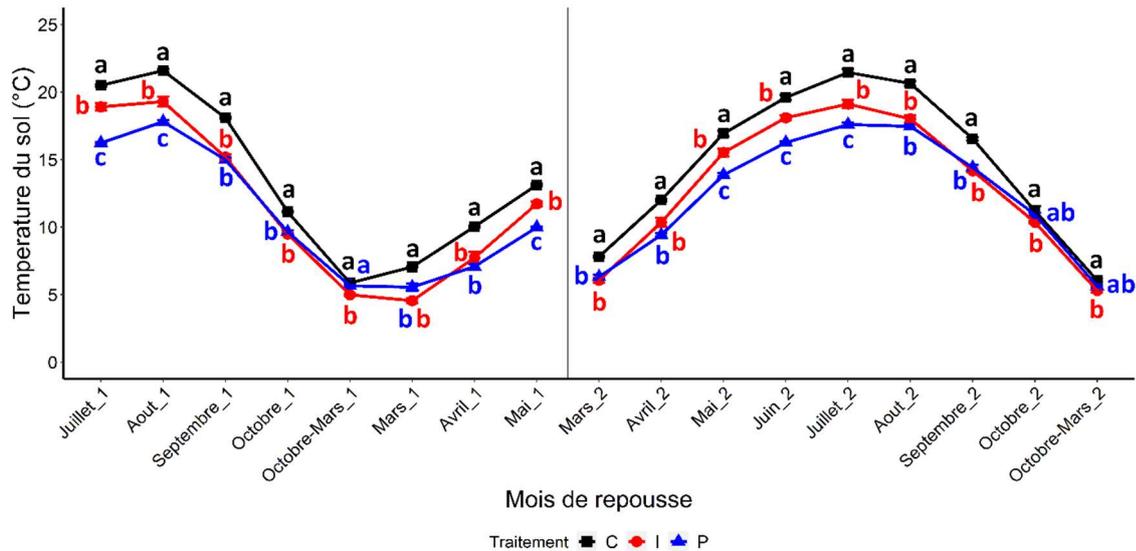


Figure 19 : Dynamique temporelle de la température du sol (°C), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la température du sol est plus élevée en Contrôle, en plein soleil, de 2.4°C par rapport au sol sous les panneaux, et cet écart peut atteindre 4°C en juillet. L'Inter-rangée présente une température plus fraîche de 1.8°C en moyenne sur deux ans par rapport au Contrôle, mais le sol peut être plus chaud de 2 à 3°C selon les saisons par rapport au sol sous les panneaux à l'ombre.

La présence des panneaux solaires a donc un impact sur les variables météorologiques en les modifiant et en créant ainsi un microclimat contrasté sous les panneaux solaires et en Inter-rangée. Cette influence des panneaux solaires modifie les conditions de développement de la végétation.

## 2.2.2 Production végétale

### 2.2.2.1 Biomasse

En moyenne sur deux ans, la production de biomasse en repousse mensuelle sur les mêmes quadrats est de 1.3 et 1.8 fois plus importante en inter-rangée qu'en contrôle et sous les panneaux, respectivement. Le contrôle est 1.4 fois plus productif que les panneaux ( $P_{2\text{ans}} = 133.58 \pm 13.2 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $I_{2\text{ans}} = 246.71 \pm 6.61 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $C_{2\text{ans}} = 189.37 \pm 17.48 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ). Cependant, ce constat n'est pas observé sur les deux années (Figure 20). En effet, lors de la première année de suivi (2020-2021, sans juin), le cumul de biomasse est similaire entre les traitements. Alors que pour la deuxième année de suivi (2022), le cumul produit par la végétation en inter-rangée est 2,3 fois plus grand que celui sous les panneaux. Le contrôle étant similaire ou intermédiaire aux deux autres traitements. En faisant la moyenne des cumuls de biomasse sous les panneaux et en inter-rangée, pour chaque année de suivi, celle-ci ne présente pas de différence significative avec le cumul obtenu en contrôle.

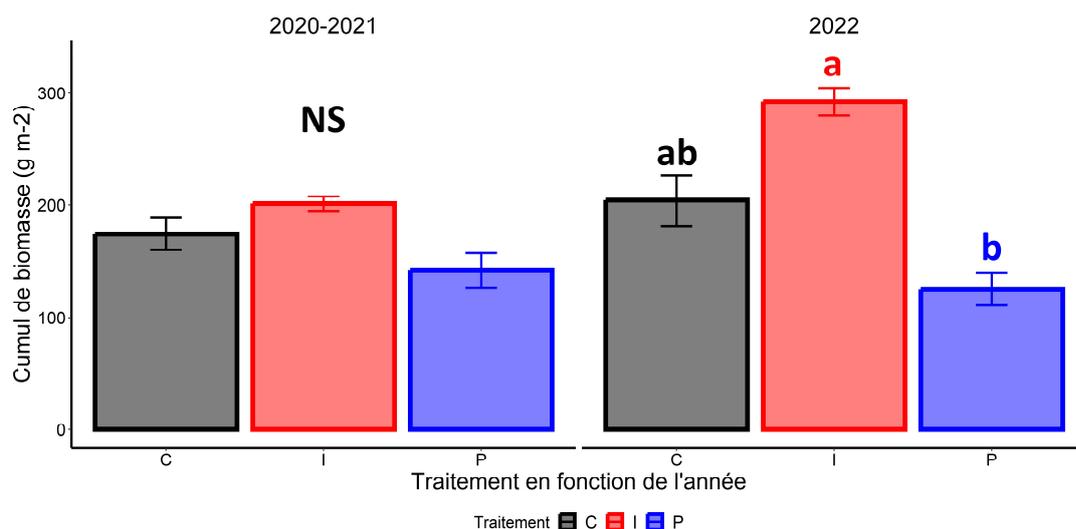


Figure 20 : Cumul annuel de biomasse (g m<sup>-2</sup>), pour chaque traitement, en exclos, sur le site de Marmanhac. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Cumul annuel  $\pm$  erreur standard par année de suivi. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Ces différences s'observent au cours d'une année, notamment au printemps, en l'absence de limitation lumineuse, avec la production de biomasse en contrôle et en inter-rangée qui est 2.1 et 2.3 fois plus importante que celle sous les panneaux (Figure 21). En été, sans limitation ou excès de rayonnement, la production de biomasse en inter-rangée est 1.7 et 1.8 fois supérieure à celle sous les panneaux et en contrôle. Lors des autres saisons, la production de biomasse est similaire. Néanmoins, en été, d'une année sur l'autre, l'effet est susceptible de changer en fonction des conditions météorologiques. En effet, la production de biomasse en contrôle a diminué un mois plus tôt lors de la deuxième année de suivi comparé à la première. De plus, il se peut qu'un regain de végétation ait lieu en septembre en fonction de l'année, comme c'est le cas lors de la deuxième année de suivi. Enfin, l'absence de données pour le mois de juin 2021 pourrait sous-estimer les différences observées sur le cumul annuel. En effet, à la vue de la ressemblance de la production de mai entre les deux années, la production théorique de juin 2021 aurait accentué les différences entre les traitements recevant de la lumière et celui sous les panneaux, pour tendre vers un cumul similaire à celui de 2022.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la végétation avec une ombre variable, en inter-rangée, produit 1.3 et 1.8 fois plus de biomasse qu'en plein soleil, en contrôle et que sous les panneaux, à l'ombre. Le contrôle est 1.4 fois plus productif que les panneaux. Cependant, la différence de biomasse n'est pas présente chaque année. Néanmoins, la réponse en été de la production en contrôle peut varier d'une année sur l'autre en fonction de la météo. La production de biomasse sous les panneaux est nettement impactée négativement lors de la pleine saison de croissance (mai, juin). Néanmoins, l'influence des panneaux semble limiter l'impact de l'arrivée des conditions estivales. Sur le site de Marmanhac, sur les deux années de suivi, la quantité de foin produite est ainsi similaire dans la zone sous influence des panneaux solaires et dans la zone sans influence. Cependant, une forte hétérogénéité spatiale est créée au sein de l'exclos entre les traitements.

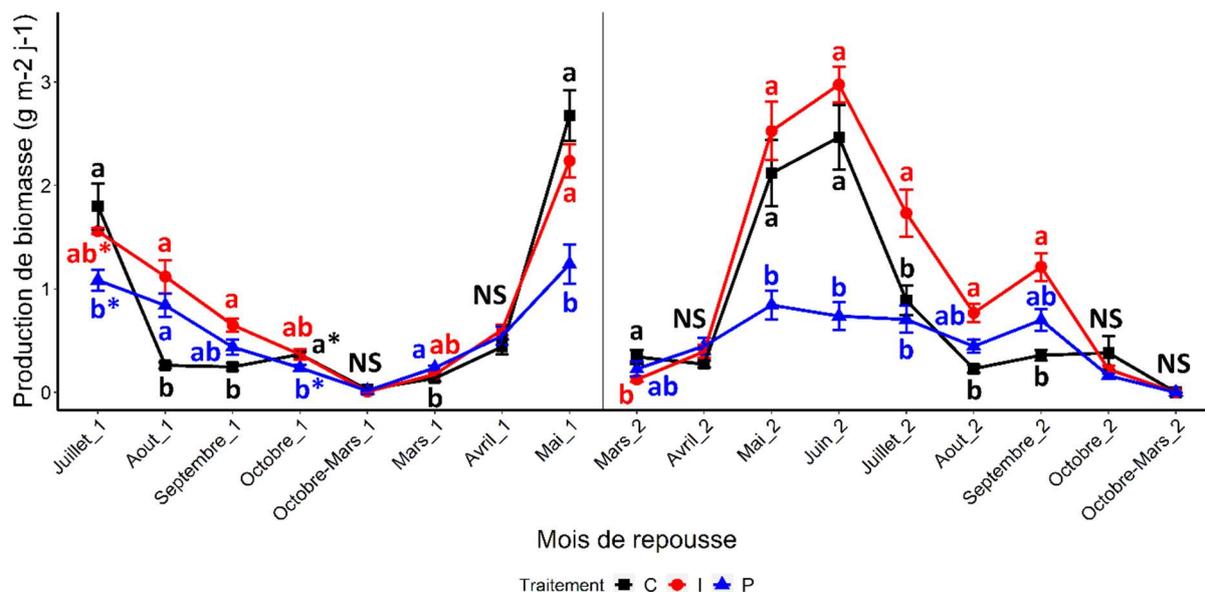


Figure 21 : Dynamique temporelle de la biomasse journalière mesurée après repousse ( $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

La biomasse produite, en plus d'être dépendante des conditions météorologiques, est aussi dépendante de variables liées à la végétation elle-même, telles que la croissance en hauteur des plantes et la qualité de la prairie.

#### 2.2.2.2 Croissance en hauteur

En moyenne sur deux ans, les croissances en hauteur de la végétation en inter-rangée et sous les panneaux sont 1,5 et 1,6 fois supérieures à celle en contrôle. Cependant, cette différence entre les traitements s'observe différemment d'une année de suivi à l'autre. Lors de la première année de suivi, seuls les panneaux présentent une croissance 2,6 fois plus rapide que celle en contrôle. En revanche, lors de la deuxième année, c'est l'inter-rangée qui présente une croissance 1,4 fois plus rapide que le contrôle. Ces effets se manifestent de manière saisonnière entre les traitements (Figure 22). En effet, en été, la croissance est nettement plus élevée en inter-rangée et sous les panneaux lors des deux années. En hiver, notamment en mars, seule la végétation sous les panneaux présente une croissance en hauteur plus précoce, bien que la réponse puisse varier en intensité d'une année à l'autre. Pour les autres saisons, les croissances sont similaires entre les traitements. Cependant, au printemps, cette similarité résulte du fait que les effets s'inversent d'une année à l'autre. En fonction des conditions météorologiques, pendant la période de pleine croissance, soit la végétation à l'ombre des panneaux est supérieure comme lors de la première année, soit elle est inférieure aux autres, comme en 2022.

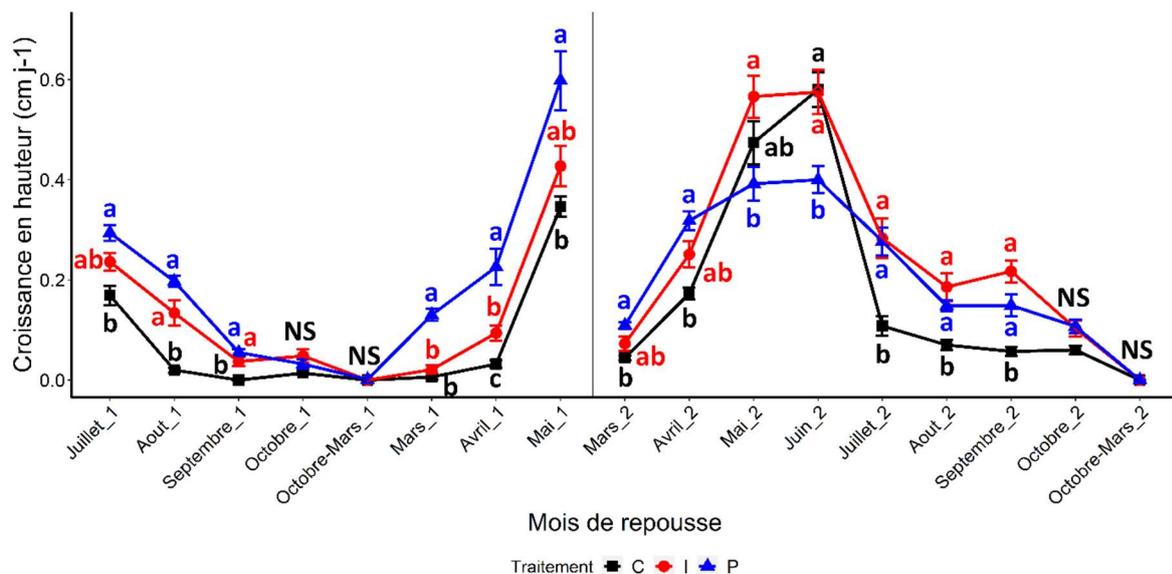


Figure 22 : Dynamique temporelle de la croissance journalière mesurée après repousse ( $\text{cm j}^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après un test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la végétation sous l'influence des panneaux solaires croît en hauteur 1.5 fois plus rapidement en inter-rangée et 1.6 fois plus rapidement sous les panneaux que celle en contrôle, en plein soleil. D'une année à l'autre, avec les changements météorologiques, les différences entre les traitements peuvent varier en intensité, comme en mars, ou présenter des effets inverses, comme en mai.

En moyenne sur deux ans, la production de biomasse et la croissance en hauteur sont donc supérieures en inter-rangée. Cependant, la croissance en hauteur sous les panneaux est similaire à celle en inter-rangée, mais ce n'est pas le cas pour la biomasse produite qui est plus faible.

### 2.2.2.3 Relation production de biomasse et croissance en hauteur

Des relations linéaires ont été obtenues entre la production de biomasse et la croissance en hauteur de la végétation, qui diffèrent entre traitements (Figure 23). La relation entre ces deux variables est significativement différente entre les trois traitements. Il faut donc 1.7 et 1.3 fois plus de croissance en hauteur sous les panneaux et l'inter-rangée, respectivement, pour arriver à la même quantité de biomasse produite qu'en Contrôle ; et 1.2 fois plus de croissance en hauteur sous les panneaux pour atteindre la même quantité de biomasse produite qu'en inter-rangée.

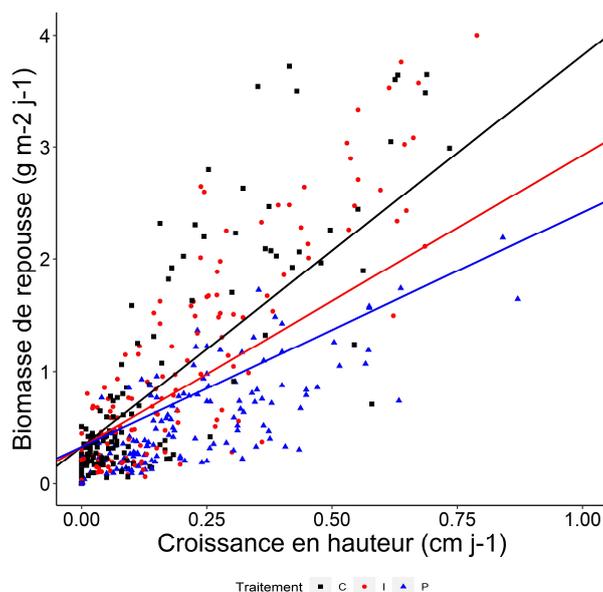


Figure 23 : Relation linéaire entre la production journalière de biomasse en fonction de la croissance journalière par traitement sur le site de Marmanhac. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Cette forte différence de relation entre la biomasse et la croissance entre les traitements peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Une modification de la qualité de la prairie entre traitements qui impacte la densité de végétation
- Une modification des communautés végétales entre les traitements
- Une modification de la physiologie des espèces induite par l'ombrage  $\approx$  étiolement

## 2.2.3 Qualité de la prairie

### 2.2.3.1 Sol nu

En moyenne sur deux ans, la quantité de sol nu visible est similaire entre les traitements (Figure 24). Ce constat est observable sur les deux années de suivis et pour toutes les saisons.

### 2.2.3.2 Mousse

En moyenne sur un an et demi, la quantité de mousse visible est 33,6 fois plus importante sous les panneaux et 37,5 fois plus importante en inter-rangée par rapport au contrôle, qui n'en possède pratiquement pas (Figure 24). Ce constat est observable sur les deux années de suivis ainsi que pour toutes les saisons.

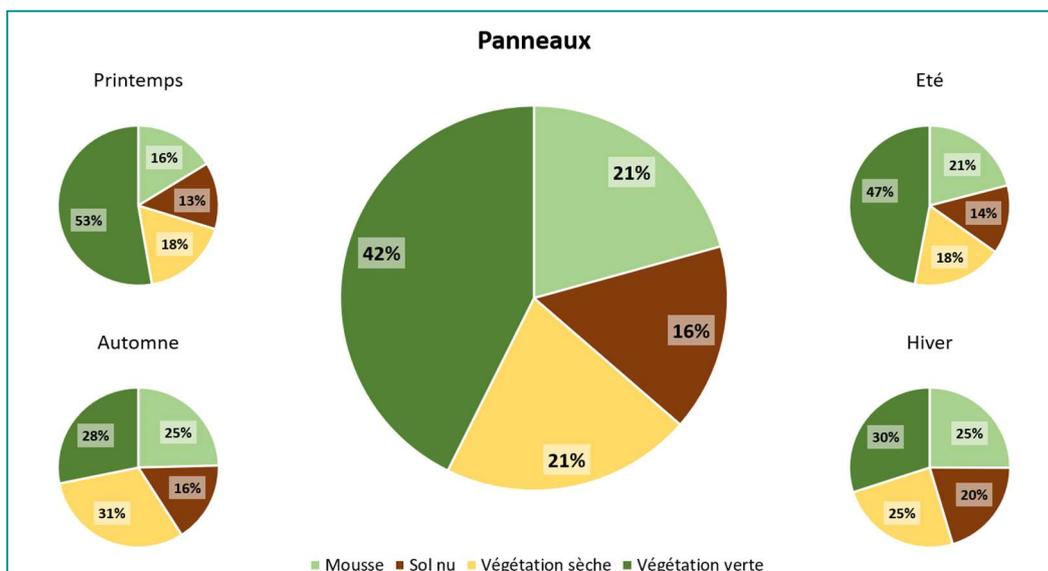
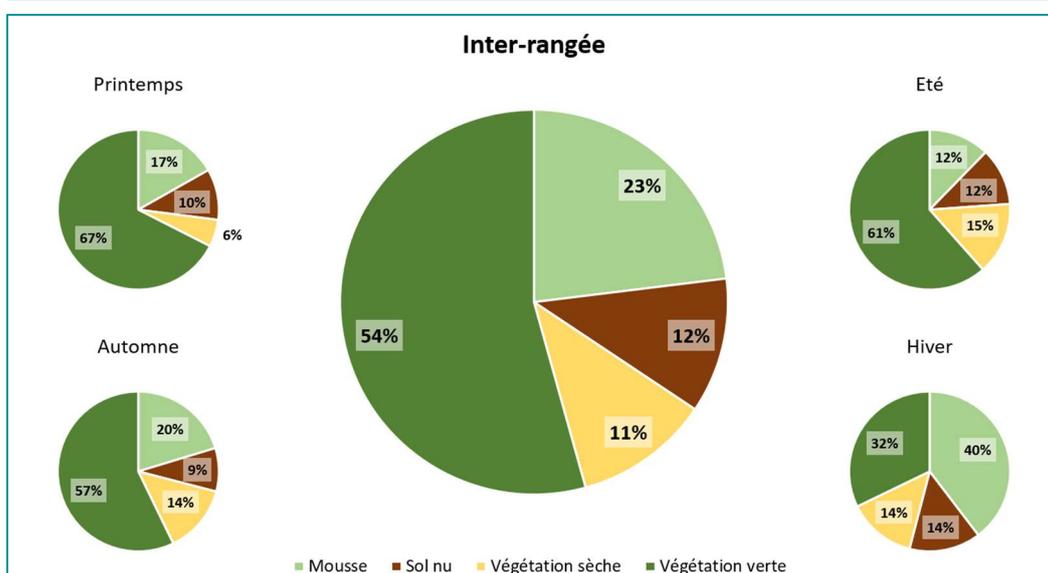
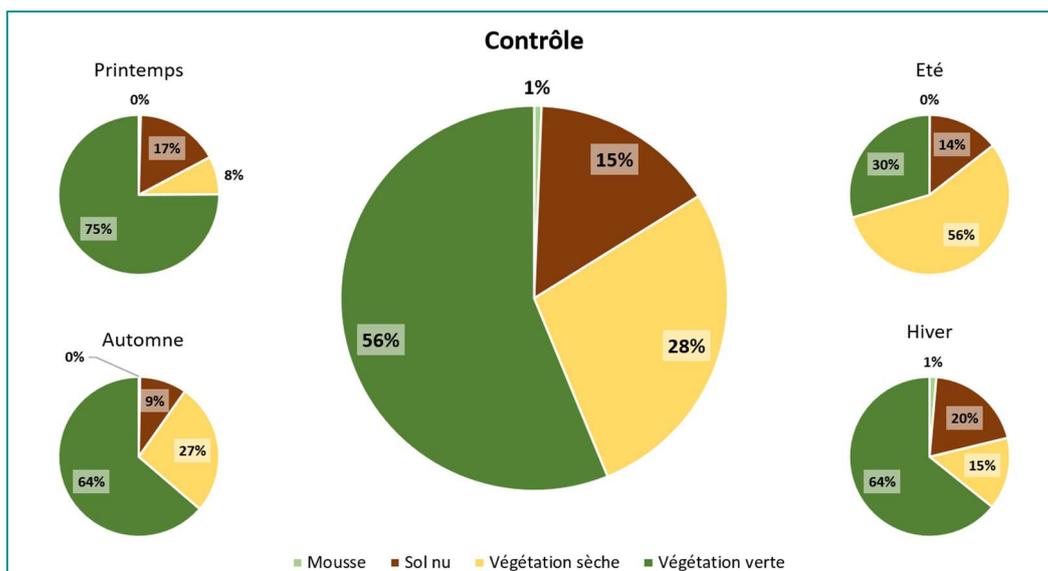


Figure 24 : Diagramme en secteurs de la qualité de la prairie (% sol nu et mousse visible, % végétation sèche et verte) par traitement en moyenne annuelle sur deux ans et en fonction des saisons sur le site de Marmahac.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité de la prairie diffère nettement entre les traitements. Les traitements sous l'influence des panneaux solaires (panneaux et inter-rangée) présentent légèrement plus de 20 % de mousse, tandis que le contrôle, en plein soleil, n'en possède pas. Cela signifie que la densité végétale est inférieure d'un cinquième dans les traitements sous l'influence des panneaux solaires. Cela réduit le recouvrement de plantes prairiales par rapport au contrôle, ce qui a un impact négatif sur la quantité de biomasse récoltée. Cependant, étant donné que l'inter-rangée et les panneaux ont la même croissance et le même recouvrement herbacé, cela ne peut expliquer la différence de biomasse entre eux. Bien que la quantité de sol nu soit similaire entre traitement, elle ne provient pas du même facteur explicatif. La quantité de sol nu sous panneaux peut être expliquée par l'effet « splash » lors de précipitations. Tandis que celle en Contrôle et Inter-rangée est expliquée par l'activité de campagnols terrestres. De plus, vu la quantité de rayonnement en moins sous panneaux, une modification de la qualité du rayonnement modifiant le ratio RC:RS (rouge clair : rouge sombre) peut avoir lieu (ie : encadré Braize). Concernant la quantité de mousse en Inter-rangée et sous panneaux, ceci peut provenir soit d'un état de sol perturbé limitant l'implantation des herbacées soit d'une hygrométrie de l'air supérieure dû à la présence des panneaux impactant le brassage de l'air et de l'humidité présente, ce qui ne semble pas être le cas en moyenne mensuelle. Néanmoins, la forte humidité du sol stable et ne s'asséchant pas durant l'été peut entrer en jeu. Cette humidité du sol à l'ombre peut aussi avoir des impacts négatifs sur le développement de la végétation herbacée induisant des conditions hydromorphiques pouvant conduire à l'anoxie des racines et ceci d'autant plus que l'évapotranspiration est réduite par l'ombrage.

### 2.2.3.3 Végétation sèche

En moyenne sur deux ans, le recouvrement de la végétation sèche varie entre les traitements. Le contrôle présente 1,3 et 2,5 fois plus de végétation sèche que sous les panneaux et en inter-rangée (Figure 24). La végétation est également 1,9 fois plus sèche en moyenne sur deux ans sous les panneaux qu'en inter-rangée. Cependant, cette réponse de la végétation sèche varie d'une année à l'autre en fonction des traitements. Lors de la première année de suivi, le contrôle et les panneaux sont similaires et présentent respectivement 2,3 et 2,4 fois plus de végétation sèche qu'en inter-rangée. Lors de la deuxième année, seul le contrôle est plus sec, avec 1,6 et 2,5 fois plus de végétation sèche que sous les panneaux et en inter-rangée. De manière saisonnière, les réponses varient, sauf en hiver où les trois traitements sont similaires. Le contrôle est plus sec que les autres traitements, notamment en été (panneaux : x3,8, inter-rangée : x3,1). En automne, le contrôle et les panneaux sont respectivement 1,9 et 2,2 fois plus secs qu'en inter-rangée. Au printemps, les panneaux sont 2,3 et 3,2 fois plus secs que le contrôle et l'inter-rangée. Cependant, ces effets peuvent varier d'une année à l'autre, notamment en termes d'intensité et de durée, comme par exemple, durant l'été. En 2020, le pic de végétation sèche en contrôle a duré un mois, contre trois mois en 2022. Le printemps présente également des variations d'une année à l'autre, avec le traitement des panneaux qui peut être plus sec que les autres traitements.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité de la prairie diffère nettement entre les traitements. Alors qu'il y a des effets négatifs dans les traitements sous l'influence des panneaux solaires sur la densité de la prairie, on constate des effets positifs sur la protection de la végétation contre le dessèchement, notamment pendant la saison estivale. En moyenne sur deux ans, la quantité de végétation sèche est 1.3 fois plus élevée en plein soleil, dans le contrôle, que sous les panneaux et en inter-rangée. Cependant, le traitement des panneaux peut montrer plus de végétation sèche que les autres traitements au cours du printemps, en fonction de l'année.

La présence des panneaux peut ainsi impacter l'état de la prairie de façon négative sur la densité mais de façon positive sur la réduction de l'assèchement de la végétation. Cependant, la création d'un microclimat peut aussi impacter l'état et la qualité fourragère de la végétation qui y pousse.

## 2.2.4 Qualité fourragère de la végétation

### 2.2.4.1 Azote (N)

En moyenne sur deux ans, la teneur en azote totale de la végétation mesurée sous les panneaux est plus importante de 15% et 50% que celle de l'Inter-rangée et du Contrôle, respectivement. L'inter-rangée est aussi 30% plus riche en azote que le Contrôle. Ce constat entre Contrôle et Panneaux se retrouve sur les deux années de suivi (Figure 25). Cependant, la différence entre l'Inter-rangée et le Panneaux n'apparaît qu'en première année de suivi. De façon saisonnière, le constat est le même qu'en moyenne sur deux années sauf en hiver où la teneur en azote entre les panneaux et l'inter-rangée est similaire.

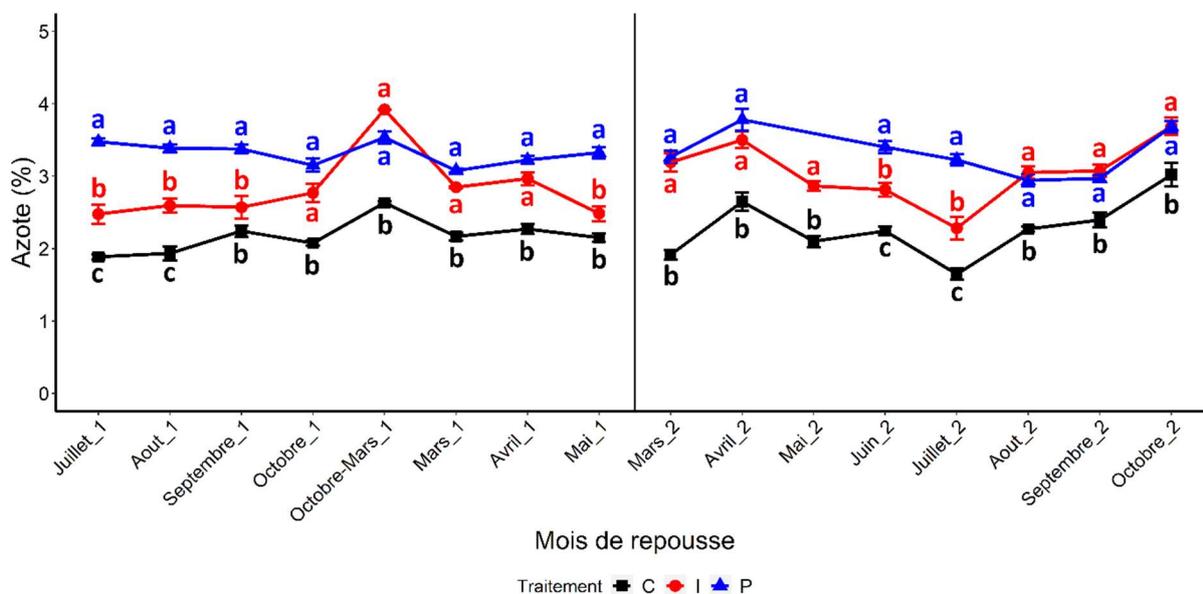


Figure 25 : Dynamique temporelle de la teneur totale en azote de la végétation, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

#### 2.2.4.2 NDF : fibres totales insolubles dans les détergents neutres

En moyenne sur deux ans, la teneur en fibres totales insolubles de la végétation est légèrement supérieure (+2 et 3%) à l'ombre des panneaux que celle mesurée en Inter-rangée et en Contrôle respectivement. Cependant, ce constat est uniquement visible lors de la première année de suivi (I = -4.1% ; C = -5.1%) (Figure 26). Effectivement, alors qu'en première année de suivi, la quantité de fibres est plus élevée sous les panneaux durant l'hiver et début printemps, en deuxième année, la teneur en contrôle et en Inter-rangées est légèrement plus élevée.

#### 2.2.4.3 Carbone (C)

En moyenne sur deux ans, la teneur totale en carbone est 1.05 (+2.7%) et 1.06 (+2.3%) fois plus élevée en Inter-rangée et en Contrôle, respectivement, par rapport à la végétation sous les panneaux. Ce constat est visible sur les deux années de suivi. Cependant, de manière saisonnière, des réponses différentes apparaissent (Figure 27). Alors qu'en automne et au printemps, le constat est le même. En été, la teneur en carbone en Contrôle qui est 1.1 fois supérieure à sous panneaux et aussi 1.03 fois supérieure à celle en Inter-rangée. En hiver, cependant, c'est la teneur en Inter-rangée qui est 1.03 et 1.06 fois supérieure à celle en Contrôle et en Panneaux. On s'aperçoit de manière mensuelle, que la teneur en carbone est plus variable et présente plus d'hétérogénéité notamment sous les panneaux durant la deuxième année de suivi.

Sur le site de Marmanhac, en moyenne sur deux ans de suivi (2020-2021 et 2022), la qualité fourragère de la végétation diffère nettement entre les traitements. La végétation à l'ombre des panneaux présente une teneur en azote 1.5 fois plus importante qu'en contrôle en pleine lumière. L'inter-rangée, d'une année sur l'autre, ne montre pas forcément moins d'azote que la végétation sous les panneaux. Cette teneur plus élevée en azote peut provenir d'une adaptation physiologique engendrée par l'ombre, en augmentant la teneur en chlorophylle pour limiter les effets de l'ombrage sur la photosynthèse et ainsi optimiser l'interception et l'utilisation du rayonnement.

La teneur en NDF, ne montre une différence qu'en première année de suivi, avec des valeurs qui sont 1.08 et 1.1 fois plus importantes sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée et au Contrôle. Un fourrage riche en NDF est peu digestible, ce qui pourrait réduire la consommation de la végétation par les ovins. Cependant, la teneur élevée en N contrebalance cette plus faible digestibilité, puisque le ratio NDF/N est 1.3 et 1.4 fois plus faible en Inter-rangée et sous les panneaux par rapport au Contrôle, respectivement, en moyenne sur deux. Ceci signifie que pour une unité d'azote consommé, la quantité de fibre ingérée est plus faible. Ainsi, la végétation à l'ombre des panneaux, voir celle en Inter-rangée en fonction de l'année, présente un apport en protéines plus important que la végétation en pleine lumière, en contrôle.

Concernant le carbone total, celui-ci est en moyenne sur deux ans, 1.05 et 1.06 fois supérieur en Inter-rangée et en Contrôle, respectivement, par rapport à la végétation sous les panneaux. Cependant, le carbone du NDF est intégré dans la mesure du carbone total. Ceci signifie qu'il y a plus de carbone qui est alloué aux fibres et donc moins de composés carbonés non structuraux dans la végétation à l'ombre des panneaux tels que l'amidon.

L'ensemble des effets observés pourrait être lié à des phénologies contrastées des plantes avec des états différents entre traitements (stade végétatif, % limbes, stade reproducteur). Ainsi, la végétation présente au sein du parc agrivoltaïque montre une diversité élevée de qualité fourragère, ce qui pourrait être bénéfique pour les ovins, qui peuvent ainsi moduler leurs choix alimentaires entre une végétation plus protéinée à l'ombre et plus énergétique au soleil.

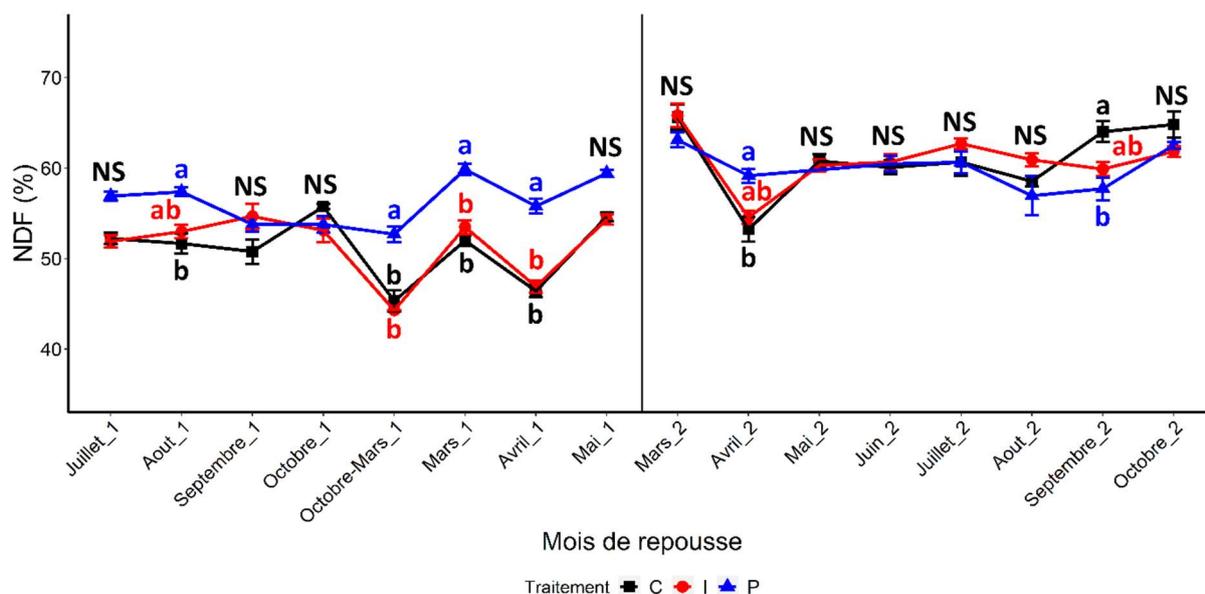


Figure 26 : Dynamique temporelle de la teneur en fibres insolubles dans les détergents neutres (NDF), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

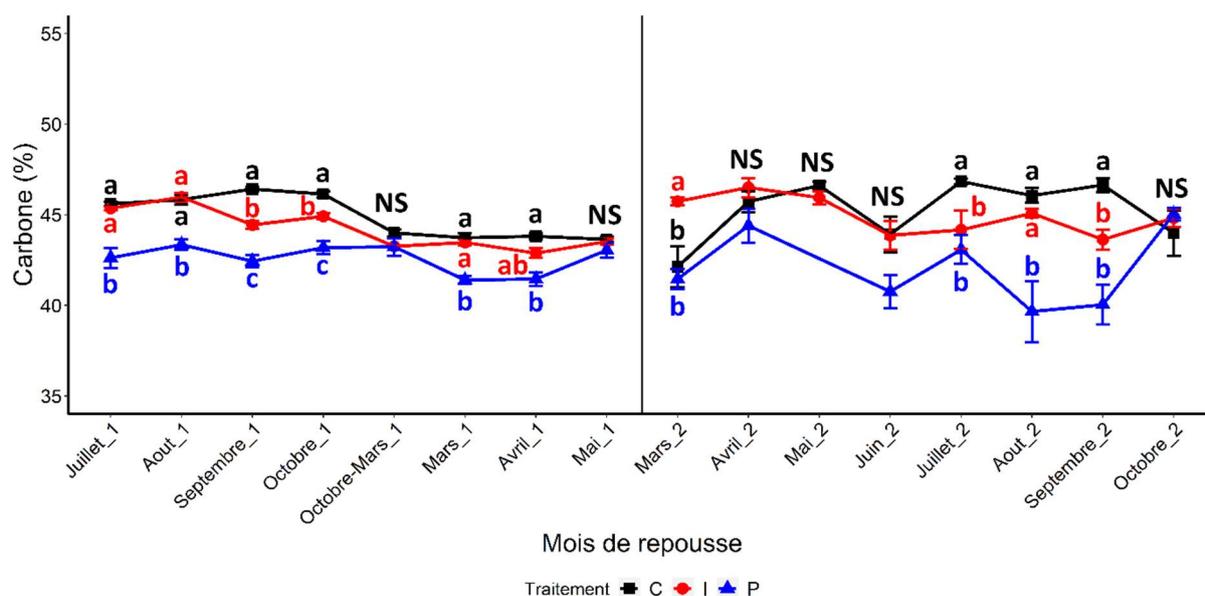


Figure 27 : Dynamique temporelle de la teneur totale en carbone de la végétation, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Marmanhac. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après un test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

La qualité fourragère de la végétation est donc diversifiée au sein du parc agrivoltaïque. Cependant, en plus des effets du microclimat, les différences peuvent être due à une modification des espèces entre traitements ainsi que des stades phénologiques.

## 2.2.5 Composition botanique des communautés végétales

### 2.2.5.1 Indices de dissimilarité

Pour savoir si les communautés végétales se distinguent les unes des autres en fonction des traitements, des indices de dissimilarités [3] ont été calculés à partir des cinq relevés botaniques, sur deux ans, observés à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>). L'indice de dissimilarité de Sorensen [4] indique qu'il y a plus de différence entre les traitements qu'à l'intérieur d'un même traitement (Figure 28). La plus grande dissimilarité est présente entre les Panneaux et le Contrôle ( $CP\beta_{SOR} = 0.66$ ). A l'inverse, la plus faible dissimilarité entre traitements est entre l'Inter-rangée et le Contrôle ( $CI\beta_{SOR} = 0.52$ ). En intra-traitement, le Contrôle présente la plus faible dissimilarité entre ses sondes ( $CC\beta_{SOR} = 0.34$ ).

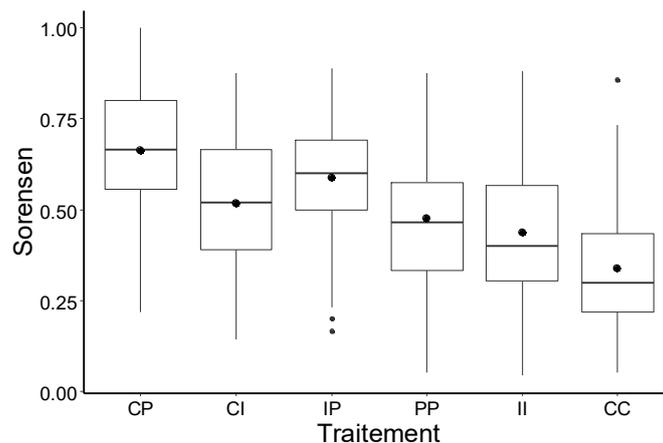


Figure 28 : Diagramme en boîte de l'indice de dissimilarité de Sorensen, sur le site de Marmanhac, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

Cet indice de dissimilarité peut être décomposé en deux composantes : la nestedness, c'est-à-dire la perte ou le gain en espèce et le turn-over, c'est-à-dire le changement d'espèces. La composante nestedness ne représente qu'une faible part de la dissimilarité de l'ordre de 22 %. Néanmoins, la plus grande variation du nombre d'espèces à l'échelle de la sonde est au sein du traitement Panneaux ( $PP\beta_{SNE} = 0.15$ ) et entre les Panneaux et l'Inter-rangée ( $IP\beta_{SNE} = 0.14$ ) (Figure 29). A l'inverse, la plus faible variation d'espèce est entre le traitement Contrôle et Inter-rangée ( $CI\beta_{SNE} = 0.08$ ). Ce qui se retrouve aussi en regardant la richesse spécifique, en effet, en moyenne sur deux ans, la richesse spécifique, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>), sous les panneaux (6.31 espèces/0.5m<sup>2</sup>) est plus faible de trois espèces par rapport au Contrôle (9.49 espèces/0.5m<sup>2</sup>) et à l'Inter-rangée (9 espèces/0.5m<sup>2</sup>).

Cependant, la majeure partie de la dissimilarité provient de la composante turn-over qui représente 78% de la dissimilarité entre les traitements. C'est-à-dire que la différence entre les traitements ne provient pas majoritairement d'une modification de la richesse spécifique, mais surtout d'un changement d'espèces. Les indices au sein d'un même traitement sont inférieurs mais proches des indices inter-traitement, ce qui signifie qu'il y a une hétérogénéité spatiale au sein de chaque traitement, ce qui est attendu en prairie. Néanmoins, l'indice est plus faible au sein du Contrôle ( $CC\beta_{SIM} = 0.25$ ) que dans les autres traitements ( $PP\beta_{SIM} = 0.33$  ;  $II\beta_{SIM} = 0.34$ ) ce qui signifie que le Contrôle semble plus homogène. De plus, l'indice de turn-over indique qu'il y a plus de différence entre les traitements qu'à l'intérieur d'un même traitement (Figure 30), ce qui montre que les différents traitements se démarquent bien entre eux, en ayant plus d'espèces différentes que semblables. De plus, le Contrôle et le Panneaux présentent plus d'espèces différentes ( $CP\beta_{SIM} = 0.56$ ) entre eux qu'avec l'Inter-rangée ( $CI\beta_{SIM} = 0.44$  ;  $IP\beta_{SIM} = 0.45$ ).

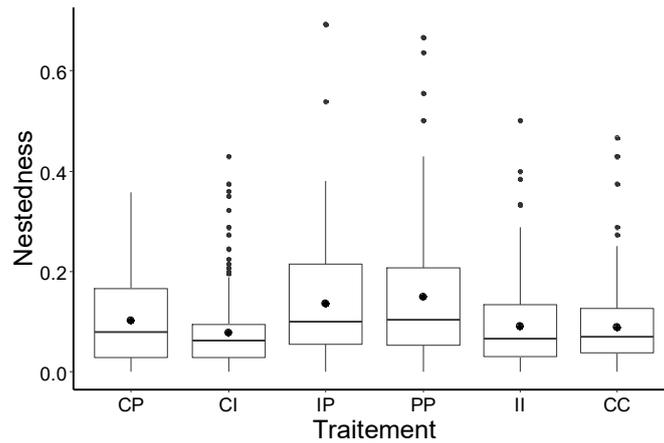


Figure 29 : Diagramme en boîte de la composante Nestedness, sur le site de Marmanhac, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

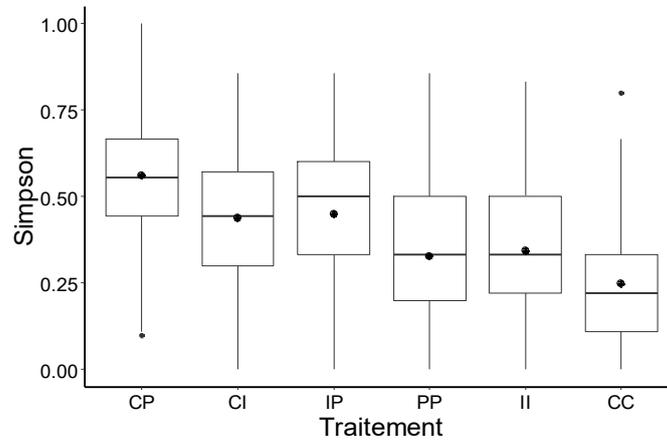


Figure 30 : Diagramme en boîte de la composante Turn-over avec l'indice de Simpson, sur le site de Marmanhac, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

### 2.2.5.2 Comparaison des communautés végétales

Sur 52 espèces en tout retrouvées sur deux ans au sein des quadrats suivis, 42 se retrouvent en Contrôle, 40 en Inter-rangée et 37 sous panneaux. La moitié des espèces est présente dans les trois traitements simultanément (Figure 31). Le traitement Contrôle comptabilise le plus d'espèces présentes exclusivement en plein soleil (7 espèces). Peu d'espèces sont spécifiques aux traitements Panneaux ou Inter-rangée (2 espèces chacun).

Pour visualiser la dissimilarité de la composition floristique entre traitement, une analyse des composantes principales (PCA) a été effectuée, dont les deux premiers axes représentent 11.73% de la variance totale, en prenant en compte les relevés botaniques sur deux ans, à l'échelle de la sonde.

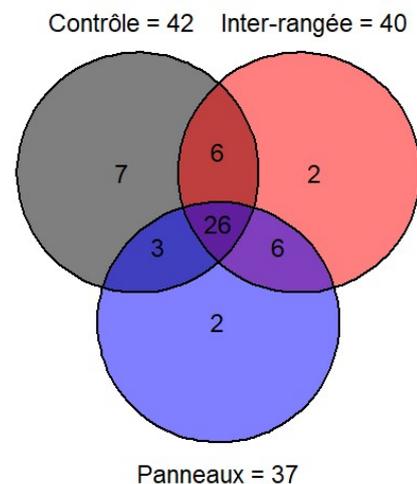


Figure 31 : Diagramme de Venn prenant en compte les 60 espèces présentes sur cinq relevés botaniques effectués sur le site de Marmanhac.

Pour distinguer au mieux la différence qu'il peut y avoir entre les traitements, une BGA (Between Group Analysis) a été réalisée puis validée par un test de permutation et de « Cross-validation » avec une procédure « leave-one-out » [5]. Les résultats du test confirment la robustesse et la significativité de la représentation qui dissocient les différents traitements. Ainsi, comme représenté dans la figure 32 et calculé par l'indice de dissimilarité, les différents traitements se distinguent les uns des autres par leur communauté végétale.



Figure 32 : Graphique de la Between Group Analysis effectuée sur une analyse des correspondantes principales ayant les deux premiers axes portant 11.73% de la variance totale. Les données botaniques proviennent de cinq relevés à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>) sur le site de Marmanhac. Les espèces représentées ont une contribution à l'axe 1 et 2 supérieures à la moyenne. Légende : Noir = Contrôle ; Rouge = Inter-rangée ; Bleu = Panneaux

Chaque traitement présente des espèces discriminantes, c'est-à-dire qu'elle participe le plus à la différenciation des traitements. Ces espèces sont représentées sur le graphique et listées dans le tableau 5 en présentant leur recouvrement moyen sur deux ans. *Arrhenatherum elatius* est l'espèce la plus abondante dans chaque traitement. C'est une espèce productive avec une qualité fourragère moyenne qui supporte mal le surpâturage ou les sols très humides [1]. Néanmoins, la dominance de cette espèce n'est pas équitable dans les trois traitements. Le traitement Panneaux (Simpson = 0.55)

montre une forte dominance de cette espèce comparée aux autres traitements (Simpson :  $I = 0.71$  ;  $C = 0.72$ ). De plus, on remarque que *Poa pratensis* est l'espèce la plus discriminante en Panneaux. C'est une espèce avec une grande amplitude écologique, considérée comme ayant une bonne valeur fourragère répartie entre le printemps et l'automne [1]. L'espèce la plus discriminante en Inter-rangée est *Ranunculus acris*. Elle est commune dans la prairie humide mais peu broutée par les herbivores puisqu'elle contient une substance toxique si elle est consommée fraîche. L'espèce est considérée comme étant sans intérêt fourrager [1]. En Contrôle, c'est *Festuca ovina* qui est la plus discriminante. C'est une espèce de prairie peu fertile avec un très faible intérêt fourrager [1]. Dans la liste des espèces discriminantes, le Panneaux présente une espèce discriminante très toxique au pâturage, *Pteridium aquilinum* [6]. C'est une fougère de bord de forêt qui indique des prairies sous-utilisées et mal entretenues. De plus, sur quatre espèces de fabacées, trois sont discriminantes en Contrôle contre une seule en Inter-rangée et zéro en Panneaux. Concernant les poacées, sur cinq espèces, deux sont discriminantes en Contrôle et en Panneaux et une en Inter-rangée.

Tableau 5 : Pourcentage de recouvrement moyen sur cinq relevés floristiques sur le site de Marmanhac pour les espèces ayant une contribution aux axes 1 et 2 de la BGA supérieures à la moyenne. Une case grisée indique que l'espèce est discriminante du traitement.

Traitement	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
<i>Achillea millefolium</i>	3.64	4.38	1.67
<i>Agrostis capillaris</i>	22.59	6.51	6.97
<i>Ajuga reptans</i>	0.00	0.19	0.00
<i>Aphanes arvensis</i>	0.07	1.11	0.06
<i>Arrhenatherum elatius</i>	28.72	39.68	48.38
<i>Cerastium glomeratum</i>	0.63	2.16	0.42
<i>Clinopodium vulgare</i>	0.10	0.70	0.00
<i>Cytisus scoparius</i>	0.10	0.00	0.00
<i>Epilobium sp</i>	0.00	1.95	6.33
<i>Festuca ovina</i>	13.37	0.38	0.56
<i>Helminthotheca echioides</i>	0.00	0.01	0.47
<i>Holcus lanatus</i>	0.83	3.04	1.91
<i>Hypochoeris radicata</i>	7.41	4.32	2.24
<i>Lotus corniculatus</i>	1.09	0.05	0.01
<i>Medicago lupulina</i>	1.30	0.17	0.00
<i>Myosotis arvensis</i>	1.13	3.01	0.01
<i>Plantago lanceolata</i>	4.30	1.43	0.19
<i>Poa pratensis</i>	2.15	9.98	17.89
<i>Polygonum aviculare</i>	0.00	0.39	0.01
<i>Pteridium aquilinum</i>	0.00	0.00	2.83
<i>Ranunculus acris</i>	0.59	3.59	0.24
<i>Rumex acetosa</i>	0.07	1.32	0.03
<i>Silene vulgaris</i>	0.55	0.08	0.00
<i>Stellaria graminea</i>	0.01	0.39	0.00
<i>Stellaria media</i>	0.18	0.61	0.07
<i>Taraxacum officinale</i>	0.77	0.78	1.78
<i>Trifolium repens</i>	2.37	3.37	0.62
<i>Veronica arvensis</i>	0.68	2.85	1.52

Sur deux ans avec cinq relevés, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>), les Poacées montrent le même nombre d'espèces dans chaque traitement (P = 2.6 ; I = 2.6 ; C = 2.9). Cependant, le recouvrement est 1.3 fois plus important sous les panneaux par rapport à l'inter-rangée (P = 76.16 %, I = 60.34 %, C = 68.81%). Pour les Fabacées, le Contrôle montre une espèce de plus (C = 1.36, I = 0.58, P = 0.24). Le recouvrement est 4 à 6 fois plus faible sous les panneaux (I = 3.73 %, C = 5.33 %, P = 0.92 %). En ce qui concerne les espèces diverses autres que Poacées et Fabacées, elles sont deux espèces en moins sous les panneaux (C = 5.22 ; I = 5.78 ; P = 3.49). Le recouvrement est 1.6 fois plus important en Inter-rangée qu'à l'ombre (I = 35.93%, P = 22.92%, C = 25.86%).

Sur le site de Marmanhac, les communautés végétales de chaque traitement se distinguent les unes des autres essentiellement par une modification des espèces et non par un changement du nombre d'espèces. Cependant, la richesse spécifique est quand même plus faible de trois espèces à l'ombre des panneaux avec une équitabilité réduite du fait de la dominance de *Arrhenaterum elatius*. La moitié des espèces rencontrées sont simultanément présentes dans les trois traitements et le Contrôle présente le plus d'espèces exclusives. Peu d'espèces sont spécifiques aux traitements Panneaux ou Inter-rangée. *Arrhenaterum elatius* est l'espèce la plus abondante dans chaque traitement. C'est une espèce productive avec une qualité fourragère moyenne qui supporte mal les sols très humides [1]. L'espèce qui définit le mieux la communauté à l'ombre des panneaux est *Poa pratensis*. Elle présente une bonne valeur fourragère à l'inverse des espèces discriminantes en Inter-rangée et Contrôle qui sont des espèces avec un faible intérêt fourrager. Bien qu'*Arrhenaterum elatius* ait le plus de recouvrement dans chaque traitement et que le traitement panneaux présente une meilleure espèce discriminante pour le pâturage, la biomasse annuelle y est plus faible. Ainsi, la communauté végétale n'est pas le driver principal pour la différence de biomasse mais participe à l'atténuation des différences. De plus, le microclimat sous les panneaux, où le sol ne s'assèche pas et reste très humide toute l'année sans recevoir de lumière directe, peut avoir un impact sur la flore et notamment *Arrhenaterum* qui supporte mal les sols humides. Dans ces conditions, la production de biomasse peut être réduite à cause du sol hydromorphe, ce qui peut expliquer que la biomasse soit plus faible sous les panneaux. Ce microclimat participe à la création d'une niche écologique à l'ombre des panneaux favorisant la présence d'espèces non désirées pour le pâturage et même toxique pour les animaux comme la fougère aigle. De plus, un fait marquant induit notamment par la forte réduction de rayonnement est la réduction en nombre et en recouvrement des espèces de la famille des Fabacées, fixatrices d'azote atmosphérique, qui sont 4 et 6 fois moins présentes sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée et à la zone en plein soleil.

En fonction des traitements et des microclimats qui y sont associés de par la présence des panneaux solaires, les communautés végétales se distinguent. Ceci induit des modifications sur la production de biomasse mais aussi sur sa qualité. Néanmoins, certaines espèces sont présentes dans les trois traitements ce qui peut être lié à une plasticité phénotypique en réponse aux différentes conditions.

## 2.2.6 Morphologie des feuilles

### 2.2.6.1 Surface foliaire spécifique (SLA)

La surface foliaire spécifique pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 25% et 49% plus grande pour la végétation en Inter-rangée et sous les panneaux que celle en Contrôle (Tableau 6). La SLA sous les panneaux est aussi 20% plus grande qu'en Inter-rangée.

Tableau 6 : Moyenne pondérée de la SLA, LDMC et de la densité des stomates par le pourcentage de recouvrement en moyenne sur cinq relevés des espèces échantillonnées présentes dans les trois traitements simultanément sur Marmanhac.

Traitement	Recouvrement (%)	SLA pondérée (cm <sup>2</sup> /g)	LDMC pondérée (g/g)	Densité stomatique pondérée (nb mm <sup>-2</sup> )
Contrôle	58.82	173.71	0.274	59.35
Inter-rangée	63.68	216.46	0.244	67.13
Panneaux	74.76	258.90	0.222	41.25

### 2.2.6.2 Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)

La teneur en matière sèche des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 23% et 10% plus importante en Contrôle et en Inter-rangée, respectivement, par rapport à celle de la végétation sous les panneaux (Tableau 6).

### 2.2.6.3 Densité stomatique

La densité des stomates des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 63 et 44 % plus importante en Inter-rangée et en Contrôle, respectivement, par rapport aux feuilles de la végétation sous les panneaux (Tableau 6). Les feuilles en Inter-rangée ont une densité stomatique seulement 13% plus importante qu'en Contrôle.

Sur le site de Marmanhac, en comparant les mêmes espèces dans chaque traitement, une plasticité morphologique est observée entre les traitements. La surface foliaire spécifique étant 1.3 et 1.5 fois plus grande dans la zone sous influence des panneaux solaires (Inter-rangée et Panneaux), ceci signifie que pour un même poids, les feuilles sont plus grandes et plus fines et d'autant plus sous les panneaux. Ce qui est en cohérence avec la relation biomasse~croissance en hauteur entre les traitements. Il y a donc un étiolement avec l'ombre et une augmentation de l'efficacité d'interception de la lumière. De plus, la teneur en matière sèche (LDMC) des feuilles est 1.2 fois plus importante en Inter-rangée. Ainsi, pour une même densité en herbacées et une même croissance en hauteur entre l'Inter-rangée et le Panneaux, l'Inter-rangée possède une biomasse plus importante.

Les feuilles à l'ombre des panneaux possèdent 1.4 et 1.6 fois moins de stomates que celles en Inter-rangée et en Contrôle. Or, plus la densité stomatique est importante et plus la végétation peut effectuer d'échanges gazeux avec l'environnement, ce qui implique une meilleure photosynthèse et une plus grande transpiration. Ceci explique qu'à l'ombre, il y a une limitation de la production de biomasse pendant la saison de pleine croissance. De plus, cette réduction de la transpiration liée à la baisse de la densité stomatique peut accentuer l'effet hydromorphe du sol ne s'asséchant pas à l'ombre.

Marmanhac été 2022

©Loan Madej



## 2.3 PARTIE 3 – EGLISOTTES

### 2.3.1 Variables environnementales

#### 2.3.1.1 Météorologie

Tableau 7 : Données météorologiques des capteurs aériens sur le site d'Eglisottes, moyenne par mois de repousse de la végétation et moyenne annuelle.

Eglisotte			Rayonnement journalier (PAR - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			Cumul de précipitations (mm)			Humidité relative (%)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Nb jour avec pluie	Contrôle	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Mars	1	27	263.08	180.59	64.09	9	21.51	0.49	75.68	77.26	74.98
Avril	1	27	366.06	252.26	76.29	10	70.74	3.15	80.76	83.18	81.82
Mai	1	28	518.74	346.94	122.13	7	21.81	0.51	76.38	81.61	79.39
Juin	1	27	462.83	319.82	83.98	16	51.46	25.03	79.81	83.35	81.16
Juillet	1	35	570.14	389.70	85.48	10	21.57	0.20	68.46	72.48	69.82
Aout	1	31	450.36	301.62	161.14	12	15.95	7.58	67.37	72.10	69.99
Septembre	1	47	287.61	198.77	73.86	32	5.76	4.15	78.86	81.76	80.02
mi-Octobre	1	27	142.34	110.69	54.33	26	6.46	4.03	85.12	87.28	85.75
Octobre-Fevrier	1	93	98.51	75.25	30.11	60	226.51	9.72	91.02	92.59	91.28
2022		342	351.07	241.74	83.49	182	442	55	78.16	81.29	79.36
Fevrier-Mars	2	26	184.05	139.06	44.50	17	97.68	16.03	85.23	87.09	85.55
Mars-Avril	2	35	315.76	239.13	77.33	23	64.52	5.19	80.05	82.08	80.36
Avril-Mai	2	36	384.25	288.74	76.80	28	35.29	0.54	82.56	85.49	83.65
Juin	2	29	468.57	359.76	94.56	21	71.59	4.25	79.84	80.96	78.98
Juillet	2	33	450.68	368.79	161.56	24	87.37	1.12	78.48	81.55	79.47
Aout	2	29	422.34	344.69	155.47	21	48.11	0.92	78.00	82.75	80.78
Septembre	2	30	322.80	269.08	121.45	21	51.85	2.18	76.83	81.09	80.20
Octobre	2	32	255.92	202.37	98.38	30	86.16	2.16	82.13	85.11	84.81
2023		250	350.54	276.45	103.75	185	543	32	80.39	83.27	81.72

Eglisotte			Température journalière de l'air (°C)			Ecart journalier moyen (°C ; Max-Min)			Moyenne Maximum   Minimum (°C)		
Mois de repousse	Année de suivi	Nombre de jours	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
Mars	1	27	9.05	8.80	9.08						
Avril	1	27	12.88	12.48	12.73						
Mai	1	28	17.30	16.51	16.94	20.14	21.82	18.69	27.11   6.96	28.31   6.49	26.77   8.08
Juin	1	27	19.87	19.23	19.57	17.83	18.50	16.25	29.12   11.29	29.28   10.79	28.32   12.06
Juillet	1	35	21.42	20.52	20.93	23.51	22.98	21.21	32.91   9.4	32.47   9.49	31.71   10.49
Aout	1	31	22.99	22.21	22.53	22.30	22.57	20.61	34.63   12.34	34.7   12.13	33.56   12.95
Septembre	1	47	16.52	16.10	16.51	18.73	18.85	18.16	26.69   7.96	26.59   7.74	26.6   8.44
mi-Octobre	1	27	13.71	13.58	13.94	14.54	14.91	14.83	21.6   7.06	21.67   6.77	22.09   7.26
Octobre-Fevrier	1	93	5.75	5.66	5.94	10.98	11.11	11.17	11.54   0.56	11.49   0.38	11.93   0.75
2022		342	15.50	15.01	15.35	18.29	18.68	17.28	26.23   7.94	26.36   7.68	25.85   8.58
Fevrier-Mars	2	26	6.49	6.29	6.55	13.31	13.51	13.45	13.83   0.52	13.86   0.35	14.17   0.72
Mars-Avril	2	35	10.89	10.57	10.94	14.54	15.05	15.09	18.32   3.77	18.45   3.4	18.98   3.89
Avril-Mai	2	36	14.09	13.75	14.17	17.48	18.91	16.78	22.53   5.05	23.76   4.84	22.98   6.19
Juin	2	29	20.29	19.86	20.29	19.59	19.12	18.00	30.28   10.69	30.09   10.97	29.84   11.85
Juillet	2	33	20.57	20.29	20.73	21.44	19.53	18.00	31.49   10.06	30.64   11.11	30.21   12.21
Aout	2	29	20.98	20.52	21.08	21.04	19.80	18.75	32.14   11.11	31.42   11.62	31.56   12.81
Septembre	2	30	20.46	20.10	20.67	22.18	20.69	19.16	32.72   10.54	31.82   11.13	31.38   12.22
Octobre	2	32	14.49	14.49	15.17	22.66	21.32	20.17	27.41   4.74	26.88   5.56	26.72   6.55
2023		250	16.03	15.74	16.20	19.03	18.49	17.43	26.09   7.06	25.86   7.37	25.73   8.31

Le site d'Eglisottes a rencontré des problèmes de rotations des panneaux en gardant les panneaux bloqués à l'horizontale d'août à octobre 2022 et de juin à novembre 2023. Ceci a donc impacté la végétation et le microclimat sous panneaux.

En moyenne annuelle, le rayonnement journalier moyen est plus élevé en Inter-rangée et sous les panneaux en deuxième année qu'en première (Tableau 7). Ceci provient du manque de données pour octobre à février de la deuxième année de suivi, mais aussi d'un problème lié à l'inclinaison des panneaux trackers bloqués à l'horizontale laissant passer ainsi plus de lumière notamment durant les mois de juillet et septembre 2023. En moyenne sur deux ans, le rayonnement est réduit de 73% sous les panneaux par rapport au Contrôle (76% 1<sup>er</sup> année ; 70% 2<sup>ème</sup> année). En prenant en compte les périodes avec une rotation fonctionnelle, la réduction est de 80 % sous les panneaux, avec 63 % de rayonnement diffus contre 49 % en plein soleil. La réduction est de 60 % quand les panneaux sont

bloqués à l'horizontale. Cependant, avec une rotation fonctionnelle, cette réduction varie au cours de l'année avec l'inclinaison du soleil. Effectivement, la réduction atteints 85 % en Juillet 2022 contre 62% en Octobre 2022. En Inter-rangée, cette réduction n'est que de 26 % (31% 1<sup>er</sup> année ; 21% 2<sup>ème</sup> année). Contrairement aux Panneaux, la réduction est stable au cours de l'année puisqu'elle provient de la rotation des panneaux qui suivent le soleil. De façon journalière, l'Inter-rangée présente une courbe semblable à celle du Contrôle bien que le rayonnement n'arrive pas aussi haut. Au sein de l'Inter-rangée, la quantité de rayonnement se décale d'Est en Ouest au sein de la journée (Figure 33). Effectivement, alors que la végétation la plus à l'Ouest (Inter-rangée 3) de l'inter-rangée perçoit le plus de rayonnement similaire au Contrôle le matin, celle à l'Est (Inter-rangée 1) ne perçoit la lumière directe qu'à partir de midi. Le problème de rotation n'impacte pas le décalage des courbes en Inter-rangée mais uniquement le maximum atteint, ce qui est aussi dépendant de la période de l'année.

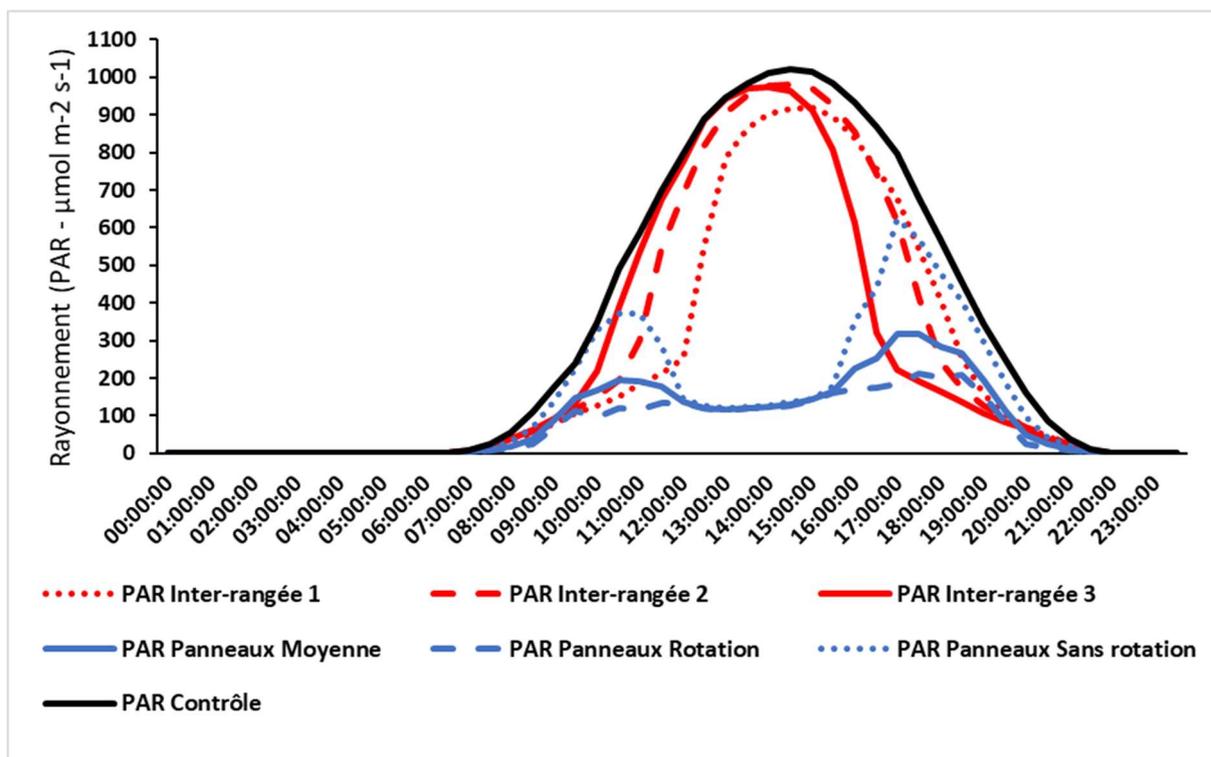


Figure 33 : Dynamique journalière du rayonnement entre les traitements en moyenne sur deux ans sur Eglisottes. Légende : noir : Contrôle ; rouge : Inter-rangée ; 1 : côté Est, 2 : Centre, 3 : côté Ouest ; bleu : Panneaux

Les précipitations ont été 1.2 fois plus importantes en deuxième année de suivi que ce soit en cumul annuel ou mensuel. La période Septembre et Octobre a notamment été très peu pluvieuse en première année. De plus, la différence est minimisée du fait de l'absence de données d'Octobre à Février. En nombre de jours de pluie, il a plu autant de jours sur la période Mars à Février de la première année que sur la période Février à Octobre de la deuxième année, c'est-à-dire en enlevant les mois d'hiver, là où la moitié des précipitations de la première année est tombée. Sous les panneaux, les précipitations sont fortement réduites, uniquement 12 % la première année et 6 % la deuxième année des précipitations sont passés sous les panneaux. Cependant, la période de Juin 2021 et Février-Mars 2022 montre des précipitations plus importantes sous panneaux. Ceci pourrait provenir de pluie qui tombe à l'opposé du sens d'inclinaison des panneaux.

Les températures journalières moyennes de l'air, en ne prenant pas en compte Octobre-Février, de la première année de suivi ne montrent pas de différence entre les deux années. Cependant, il a fait plus frais de 2 à 3°C en début d'année 2023 par rapport à 2022. L'année 2023 a présenté un été aussi plus frais de 1 à 2°C, mais un automne plus chaud allant à 4°C de plus en Septembre 2022. Entre les traitements, bien que l'écart ne dépasse jamais 1°C, les traitements Contrôle et Panneaux sont plus chauds en moyenne journalière par période que l'Inter-rangée quelle que soit la période. Entre le

Contrôle et le Panneaux, les effets varient d'une année à l'autre. Le Panneaux a été plus frais la première année, mais plus chaud la deuxième. Ceci pourrait être dû aux problèmes liés à l'inclinaison des panneaux et donc à un changement dans les masses d'air sous panneaux. Entre les deux années, il ne semble pas y avoir de différence dans le nombre de jours avec une température moyenne inférieure à 0°C en omettant la période Octobre-Février uniquement disponible pour la première année de suivi. Le Panneaux présente tout de même un jour de moins où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0°C. En regardant l'écart de température moyen journalier entre le maximum enregistré et le minimum par jour, le Panneaux a une température qui varie moins. Cette réduction d'écart est en moyenne de 1 à 1.6°C par rapport aux autres traitements, mais cette différence augmente avec les fortes températures et peut aller jusqu'à 3.4°C avec le Contrôle notamment en Juillet 2023. L'écart est notamment expliqué par des températures minimales plus chaudes sous les panneaux en moyenne d'1°C. Ce minimum sous panneaux se différencie plus, par rapport au plein soleil, lors de forte chaleur et se minimise lors de faible température. A l'inverse, les températures maximales sous panneaux sont plus fraîches pendant de forte chaleur. Cependant, en hiver, les températures maximales sous les panneaux sont légèrement plus chaudes (+0.5°C). Entre l'Inter-rangée et le Contrôle, cet écart de température dans une journée varie entre les années.

Sur le site d'Eglisottes, la quantité de rayonnement incident en Contrôle est identique lors des deux années, cependant, suite à un problème de rotation des panneaux, la deuxième année de suivi montre un rayonnement plus élevé en Inter-rangée et Panneaux. Néanmoins, la réduction de rayonnement est de l'ordre de 73% (voir 80 %) sous les panneaux en moyenne annuelle en variant avec les saisons et légèrement au cours de la journée en lien avec l'inclinaison du soleil. En Inter-rangée, la réduction est de l'ordre de 26 % en restant stable au cours de l'année, mais en variant journalièrement d'Est en Ouest.

Les précipitations varient entre 2022 et 2023, effectivement, en deuxième année, les précipitations sont 1.2 fois plus importantes. La quantité de précipitations varie énormément entre le Contrôle et le Panneaux qui ne laisse passer qu'une petite partie des pluies.

La température journalière en moyenne annuelle semble équivalente. De plus, la température moyenne journalière ne varie que très peu entre les traitements, bien qu'elle soit plus faible en Inter-rangée. Néanmoins, la température est plus stable sous les Panneaux qui présentent un écart entre le maximum et le minimum journalier plus faible et cette différence entre traitements est d'autant plus importante lors de forte température.

### 2.3.1.1 Humidité du sol

En moyenne sur deux ans, l'humidité du sol est 1.9 et 2.1 fois supérieure en Inter-rangée et Panneaux par rapport au Contrôle. Ce constat est visible sur les deux années et quelle que soit la saison. Bien qu'en automne après un été chaud jusqu'en septembre, l'humidité tend à être identique notamment entre Panneaux et Contrôle comme en Octobre 2023 (Figure 34). Au cours de l'année, l'humidité de chaque traitement chute durant la période estivale où l'écart d'humidité arrive à 32% d'humidité en plus sous panneaux comme en Juin-Juillet 2023 par rapport au Contrôle, soit 2.2 fois plus humide. Cependant, quand le Panneaux atteint son minimum en été, cela correspond au maximum du Contrôle en hiver. Aucune différence de sol n'a été remarquée par rapport à la granulométrie qui correspond à un sol limono-sableux dans chaque traitement et une pierrosité identique et inférieure à 1%. Cette forte différence peut être expliquée par la pédologie avec la proximité de la nappe proche de la surface ainsi que d'un fossé distant de 100 m environ des transects suivis en Inter-rangée et Panneaux, mais de 130 m des transects en Contrôle. Un sondage pédologique pré-construction à mi-distance entre le fossé et l'emplacement actuel de nos transects en Inter-rangée et Panneaux montrait une zone de

battance de la nappe remontant jusqu'à 20 cm de profondeur. Ceci correspond à la profondeur de nos sondes d'humidité.

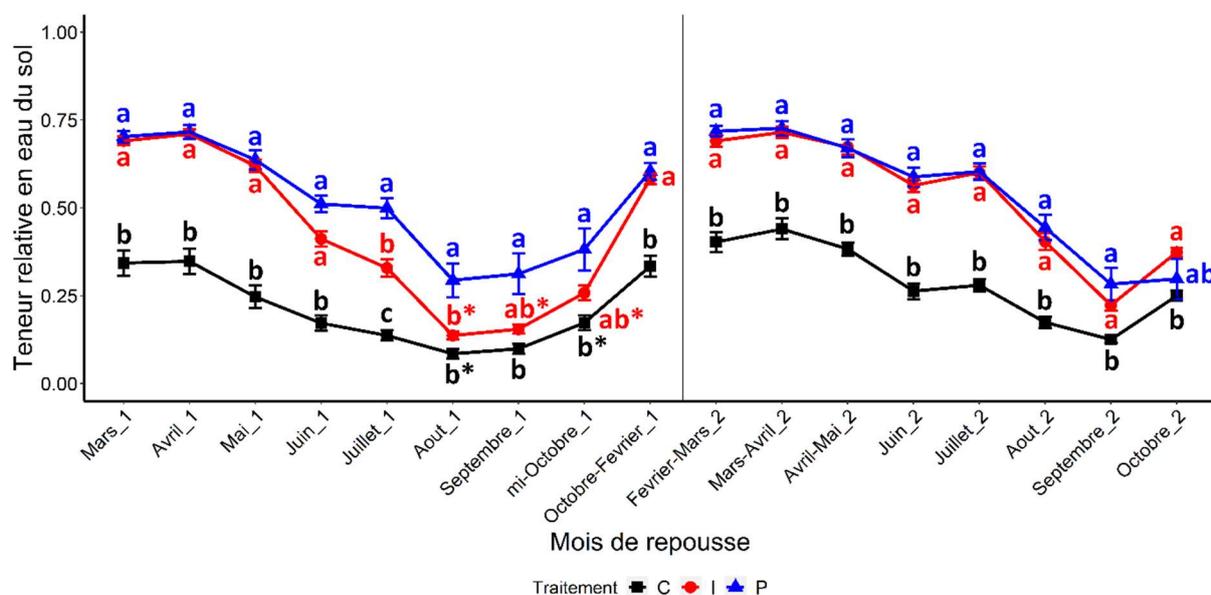


Figure 34 : Dynamique temporelle de la teneur relative en eau du sol, en excluant, et pour chaque traitement, sur le site d'Eglisottes. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après un test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale ( $P < 0.1$ ). Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site d'Eglisottes, en moyenne sur deux ans de suivi (2022 et 2023), l'humidité du sol est 1.9 et 2.1 fois supérieure en Inter-rangée et Panneaux qu'en Contrôle. Cette différence s'observe pour chaque saison bien que l'écart se minimise à la suite de saison chaude. Cette forte différence majoritairement constante au cours de l'année serait surtout due à la pédologie du sol avec la proximité de la battance de la nappe et d'un fossé en Inter-rangée et Panneaux.

### 2.3.1.1 Température du sol

En moyenne sur deux ans, la température du sol à 20 cm de profondeur en Contrôle est 1.4 et 2°C plus chaude que l'Inter-rangée et Panneaux. Ce constat se retrouve sur les deux années bien que la différence soit moins marquée lors de la deuxième année. Effectivement, lors de la deuxième année, les températures ont commencé à décroître qu'entre Septembre et Octobre alors que c'est un mois plus tôt en 2022 (Figure 35). Néanmoins, l'écart apparaît progressivement au cours de l'année, avec un réchauffement plus lent sous les panneaux. Effectivement alors qu'au printemps, les trois traitements sont différents, en fin d'été, l'Inter-rangée et le Panneaux tendent à se ressembler avant de diminuer en automne. L'écart maximum en moyenne sur une période entre le Contrôle et le Panneaux est de 4°C en Juillet 2022 et 2.9°C en Juin 2023. En Inter-rangée, l'écart maximum avec le Contrôle est de 2.9°C en Juillet 2022 et de 1.8°C en Septembre 2023.

Sur le site d'Eglisottes, en moyenne sur deux ans de suivi (2022 et 2023), la température du sol en Contrôle est plus chaude que l'Inter-rangée et le Panneaux de 1.4 et 2°C. Cette différence peut atteindre 3°C en Inter-rangée et 4°C sous panneaux en fonction de l'année pendant la période estivale. La température du sol se réchauffe plus lentement avec l'ombrage.

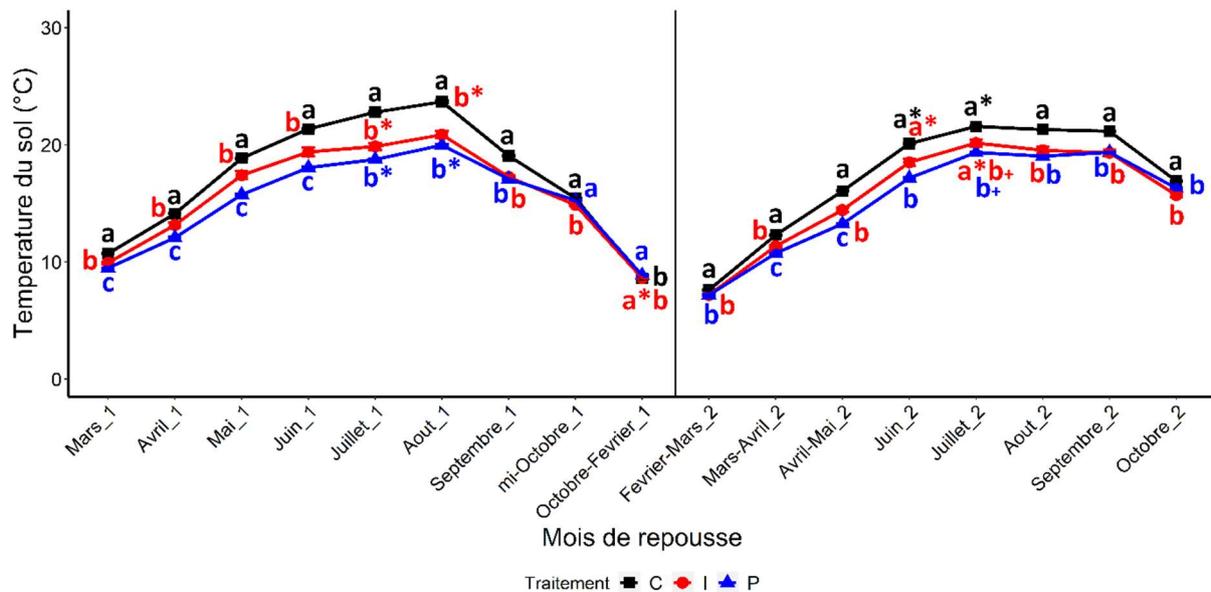


Figure 35 : Dynamique temporelle de la température du sol (°C), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site d'Eglisottes. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale ( $P < 0.1$ ). Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

La présence des panneaux solaires a donc un impact sur les variables météorologiques en les modifiant et en créant ainsi un microclimat contrasté sous les panneaux solaires et en Inter-rangée. Cette influence des panneaux solaires modifie les conditions de développement de la végétation.

## 2.3.2 Production végétale

### 2.3.2.1 Biomasse

En moyenne sur deux années de suivi, la production de biomasse est 1.6 fois plus importante en Inter-rangée et sous les panneaux par rapport au Contrôle ( $P_{2ans} = 353.03 \pm 22.16 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $I_{2ans} = 356.95 \pm 19.35 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ,  $C_{2ans} = 225.48 \pm 11.93 \text{ g/m}^2/\text{an}$ ). Cependant, ce constat se retrouve uniquement dans le cumul annuel de biomasse de la première année. En première année, le cumul de biomasse est 1.7 et 1.9 fois plus important en Panneaux et en Inter-rangée qu'en Contrôle (Figure 36). En deuxième année, il n'y a pas de différence significative dans le cumul de biomasse. L'absence de données pour le mois de septembre 2022 ne semble pas biaiser les résultats obtenus. Effectivement, le contrôle ne produit jamais plus que les autres traitements ce qui ne changerait pas les tendances obtenues. En deuxième année, on ne s'attend pas à avoir une production très importante pour Février 2024, néanmoins, si la production est légèrement plus importante en Panneaux et Inter-rangée, cela pourrait participer à passer le seuil de significativité par rapport au Contrôle. D'une année sur l'autre, les différences interviennent à des saisons différentes. Effectivement, durant la première année, c'est au printemps que la différence de biomasse se constate avec un pic de production allant jusqu'à 2.4 et 2.8 fois plus, en mai 2022 en Panneaux et en Inter-rangée, par rapport au Contrôle (Figure 37). Ce pic en mai n'a pas lieu en deuxième année. Durant la deuxième année, c'est en été que la différence de production est visible en présentant un écart en Août avec 4.4 et 4.6 fois plus de production de biomasse en Inter-rangée et en Panneaux, bien que le pic de production soit en Juillet. Cette différence estivale n'a pas lieu durant la première année. Le reste du temps, la production de biomasse entre les

trois traitements est statistiquement similaire. De plus, une légère reprise plus précoce de la production de la végétation est observable dès la sortie de l'hiver en étant plus visible en deuxième année où le Panneaux produit 6.3 fois plus de biomasse par rapport au Contrôle sur la période mi-février mi-mars où le Contrôle n'a quasiment pas encore repris de production.

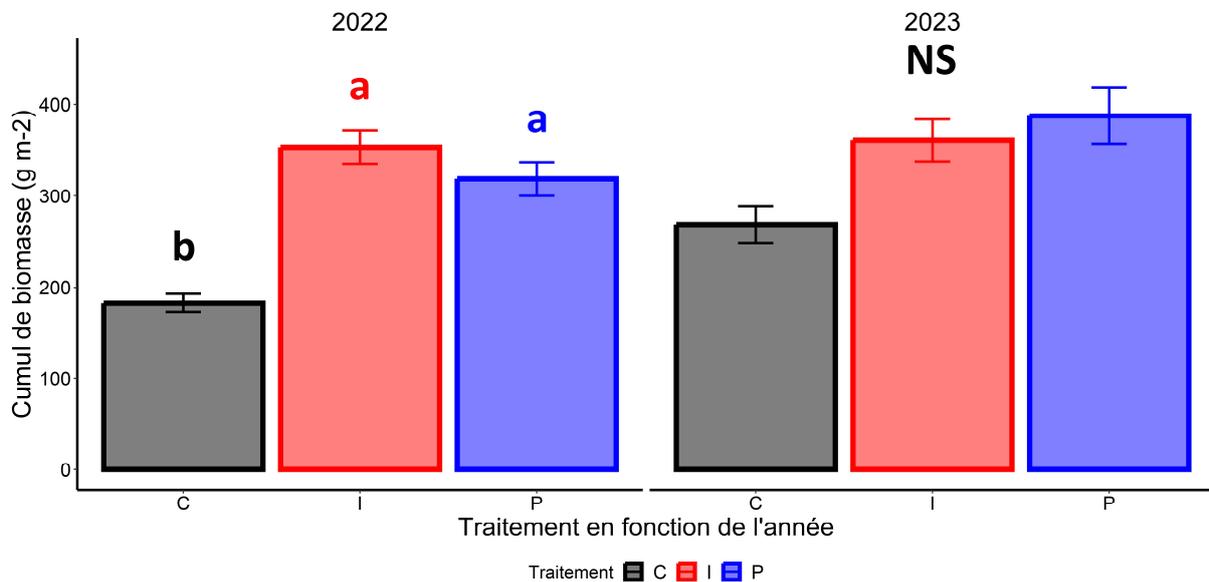


Figure 36 : Cumul annuel de biomasse ( $g\ m^{-2}$ ), pour chaque traitement, en exclos, sur le site d'Eglisottes. Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Cumul annuel  $\pm$  erreur standard par année de suivi. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

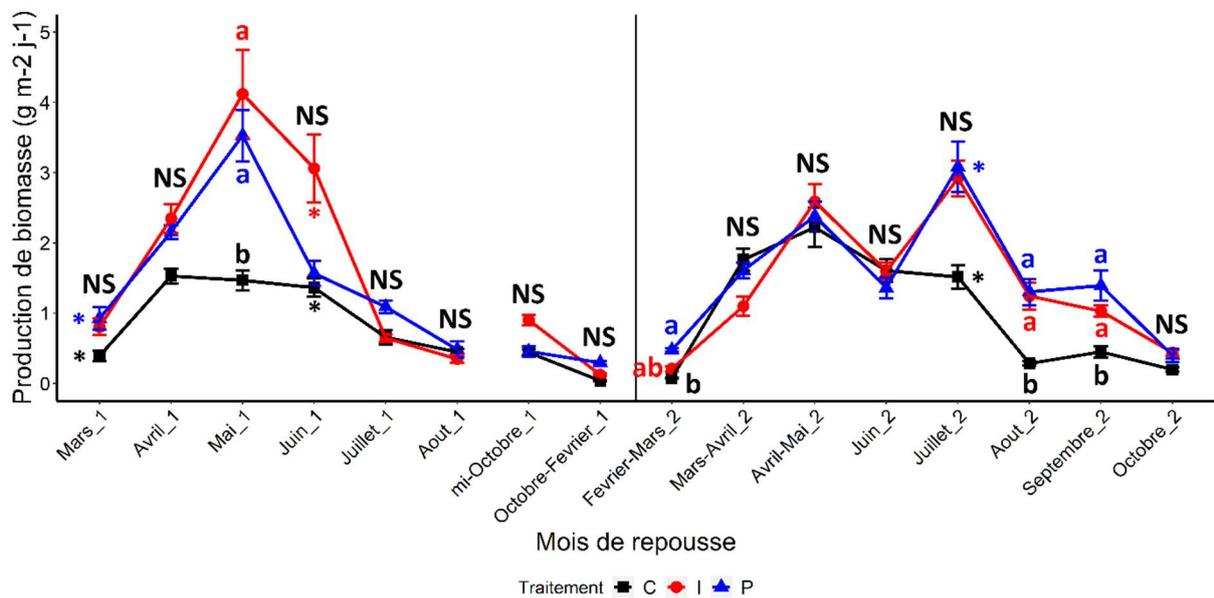


Figure 37 : Dynamique temporelle de la biomasse journalière mesurée après repousse ( $g\ m^{-2}\ j^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site d'Eglisottes. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une Anova et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale ( $P < 0.1$ ). Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site d'Eglisottes, en moyenne sur deux ans de suivi (2022 et 2023), la végétation sous l'influence des panneaux solaires (Inter-rangée et Panneaux) produit 1.6 fois plus de biomasse que celle en plein soleil, en Contrôle. Néanmoins, certains effets marquants au cours de l'année varient d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques tel qu'en Mai 2022 où la production de biomasse est limitée en Contrôle, mais pas en Panneaux et Inter-rangée lors d'une période plus chaude et sèche. Quand les conditions sont optimales au printemps, comme durant la deuxième année, la production est similaire. De plus, en été, quand les températures sont moins chaudes et qu'il y a plus de précipitations comme en 2023 par rapport à 2022, la végétation produit plus de biomasse dans les traitements sous influence des panneaux solaires qu'en plein soleil. Cependant, cet effet peut provenir du problème de rotation des panneaux laissant passer ainsi plus de lumière pour la photosynthèse. Ainsi, la production sous l'influence des panneaux solaires est équivalente ou supérieure à celle en

La biomasse produite, en plus d'être dépendante des conditions météorologiques, est aussi dépendante de variables liées à la végétation elle-même, comme la croissance en hauteur des plantes et la qualité de la prairie.

#### 2.3.2.1 Croissance en hauteur

En moyenne sur deux ans, la croissance est différente dans chaque traitement. La végétation présente sous les panneaux croît le plus en hauteur en étant 1.3 et 1.6 fois supérieure comparé à l'Inter-rangée et au Contrôle. En Inter-rangée, la croissance en hauteur de la végétation est 1.2 fois supérieure au Contrôle. Ce constat s'observe uniquement en première année de suivi. En deuxième année, il n'y a que la végétation présente en traitement Panneaux qui a une croissance en hauteur 1.4 fois supérieure au Contrôle et le traitement Inter-rangée qui est intermédiaire. De façon saisonnière, les croissances diffèrent entre traitements (Figure 38). En été et en automne, la croissance en Inter-rangée et sous les panneaux tend à se ressembler ainsi que la croissance entre le Contrôle et l'Inter-rangée durant le printemps. En regardant mois par mois, la croissance sous les panneaux reprend plus précocement dès la sortie de l'hiver par rapport aux deux autres traitements (Mars 2022 : 2.4 et 3 fois plus que I et C ; Février-Mars 2023 : 2.4 et 6.4 fois plus que I et C). Durant la saison de pleine croissance, en mai, la réponse est différente d'une année sur l'autre. Effectivement, alors qu'en deuxième année, vers mai, la croissance est similaire dans chaque traitement, en première année le Panneaux est 2.7 fois supérieur au Contrôle et tend à être 1.5 fois supérieur à l'Inter-rangée. Durant la période estivale, la croissance est plus restreinte en Contrôle sur les deux années. En inter-rangée, la croissance est restreinte comme en Contrôle la première année. Cependant, les différences ne s'observent qu'en Juillet où le Panneau croît 2.7 et 5.1 fois plus vite qu'en Inter-rangée et Contrôle. En deuxième année, l'inter-rangée est intermédiaire en juillet ou tend à ressembler aux panneaux en août. Sur ces mêmes périodes, le Panneaux pousse 1.7 et 2.4 fois plus que le Contrôle.

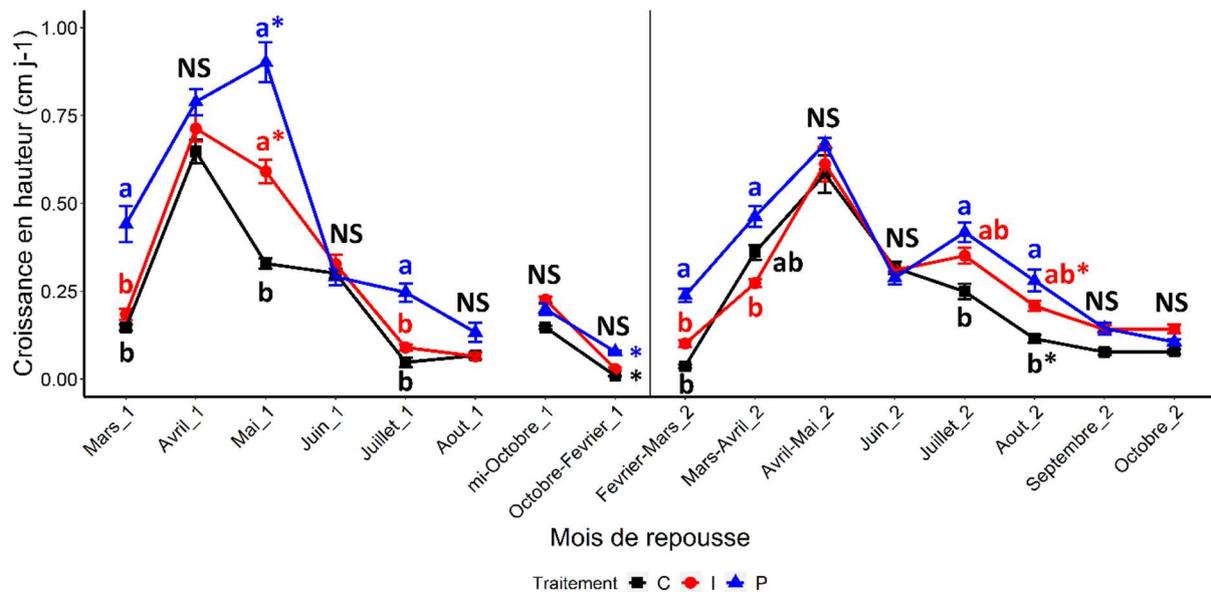


Figure 38 : Dynamique temporelle de la croissance journalière mesurée après repousse ( $\text{cm j}^{-1}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site d'Eglisottes. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$ . Un symbole sur le côté droit d'une lettre identique indique une similarité marginale, si les lettres sont différentes, cela indique une différence marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle. La barre verticale sépare les deux années de suivis.

Sur le site d'Eglisottes, en moyenne sur deux ans de suivi (2022 et 2023), la croissance en hauteur de la végétation à l'ombre sous les panneaux solaires est 1.3 et 1.6 fois plus importante que celle en Inter-rangée, qui est soumise à une ombre variable, et que celle en Contrôle, exposée en plein soleil. Elle est aussi plus précoce à la sortie de l'hiver. D'une année à l'autre, avec les changements météorologiques, les différences entre les traitements varient en intensité, mais elles ne montrent pas d'effets inverses. La croissance est limitée en Contrôle durant une période sèche et plus chaude comme en mai 2022 par rapport à 2023 contrairement aux autres traitements.

La production de biomasse et la croissance en hauteur sont donc supérieures en moyenne sur deux ans sous les panneaux. Cependant, les écarts entre les traitements pour ces deux variables ne sont pas du même ordre. En effet, la croissance en hauteur peut présenter des écarts significatifs sans toutefois être observée pour la production de biomasse, comme en mars 2022, juillet 2022 ou septembre 2023, par exemple.

### 2.3.2.1 Relation production de biomasse et croissance en hauteur

La relation qui existe entre la production de biomasse et la croissance en hauteur de la végétation est similaire entre le Contrôle et le Panneaux (Figure 39). Cependant, ces deux traitements doivent avoir 1.4 et 1.5 fois plus de croissance en hauteur pour arriver à la même quantité de biomasse qu'en Inter-rangée.

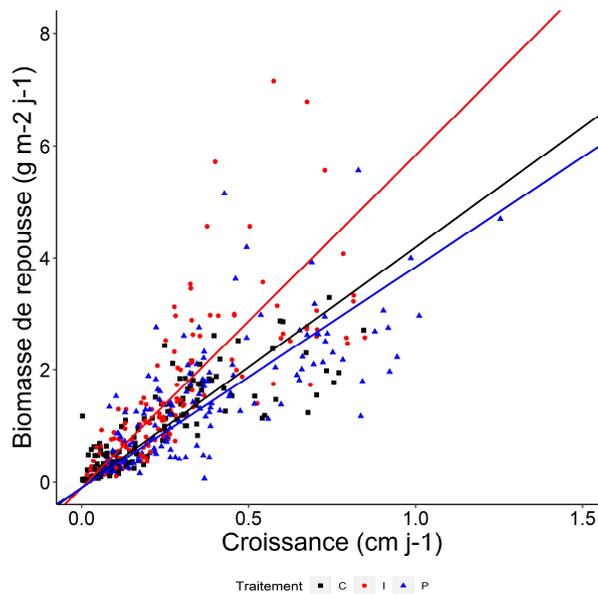


Figure 39 : Relation linéaire de la production journalière de biomasse en fonction de la croissance en hauteur journalière par traitement sur le site d'Eglisottes. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Cette forte différence de relation entre la biomasse et la croissance entre les traitements peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Une modification de la qualité de la prairie entre traitements qui impacte la densité de la végétation
- Une modification des communautés végétales entre les traitements
- Une modification de la physiologie des espèces induite par l'ombrage ≈ étiolement

### 2.3.3 Qualité de la prairie

#### 2.3.3.1 Sol nu

En moyenne sur deux ans, le sol nu visible est 1.9 fois plus important en contrôle qu'en Inter-rangée et Panneaux (Figure 40). Ce constat se fait essentiellement au cours de la deuxième année et notamment au cours du printemps. En été, uniquement le panneau présente moins de sol nu. En deuxième année, le sol nu est apparu en contrôle à la suite d'activité de taupes.

#### 2.3.3.1 Mousse

En moyenne sur deux ans, la mousse visible est 13.1 fois plus importante en Contrôle par rapport aux Panneaux (Figure 40). L'inter-rangée est intermédiaire. Ce constat est visible sur les deux années de suivi essentiellement en automne et hiver. Néanmoins, à la vue de la quantité réelle de mousse minime, ces différences significatives de l'ordre de 0.9 % d'écart sont objectivement négligeables.

### 2.3.3.1 Végétation sèche

En moyenne sur deux ans, la quantité de végétation sèche est 1.5 fois plus importante en Contrôle que sous les panneaux (Figure 40). Elle tend aussi à être 1.5 fois plus importante par rapport à l'Inter-rangée. Ce constat est essentiellement visible lors de la première année. Effectivement, alors qu'en deuxième année, le Contrôle tend à être 2.6 fois plus sec que sous les panneaux uniquement en août, en première année, la quantité de végétation sèche augmente significativement, en été. L'augmentation de la quantité de végétation sèche est visible au cours de l'été d'abord en contrôle, puis en Inter-rangée et enfin sous les panneaux. Bien qu'en août 2022, la quantité de végétation sèche soit similaire entre les trois traitements, un mois plus tôt, il y a 2.7 et 3.1 fois moins de végétation sous les panneaux par rapport à l'Inter-rangée et au Contrôle.

Sur le site d'Eglisottes, en moyenne sur deux ans de suivi (2022 et 2023), la qualité de la prairie diffère légèrement entre les traitements. Uniquement un écart de 5% de sol nu, plus important en Contrôle vient légèrement diminuer la densité de la végétation herbacée. Ceci est dû à l'activité des taupes et peut participer à la différence de relation entre la biomasse et la croissance. L'augmentation du rayonnement sous les panneaux et la rotation des panneaux limitant le ruissellement des précipitations au même endroit doit contribuer à la réduction de sol nu comparé à celui présent dans les parcs à infrastructures fixes. De même, le déplacement du rayonnement en Inter-rangée au cours de la journée doit limiter les effets de l'hygrométrie sur la colonisation de la mousse.

De plus, on constate des effets positifs de la présence des panneaux sur la protection de la végétation contre le dessèchement en Inter-rangée et sous les panneaux, notamment pendant l'été, en ralentissant l'apparition de la végétation sèche. En moyenne sur deux ans, la quantité de végétation sèche est 1.5 fois plus élevée en plein soleil, dans le Contrôle, qu'en Inter-rangée et sous les panneaux.

La présence des panneaux n'impacte pas l'état de la prairie ni la densité des herbacées. De plus, la présence des panneaux joue un rôle en limitant l'assèchement de la végétation durant la période estivale. Cependant, la création d'un microclimat peut aussi impacter l'état et la qualité de la végétation qui y pousse.

## 2.3.4 Qualité de la végétation (en cours)

### 2.3.4.1 Azote (N)

### 2.3.4.2 NDF : fibres totales insolubles dans les détergents neutres

### 2.3.4.3 Carbone (C)

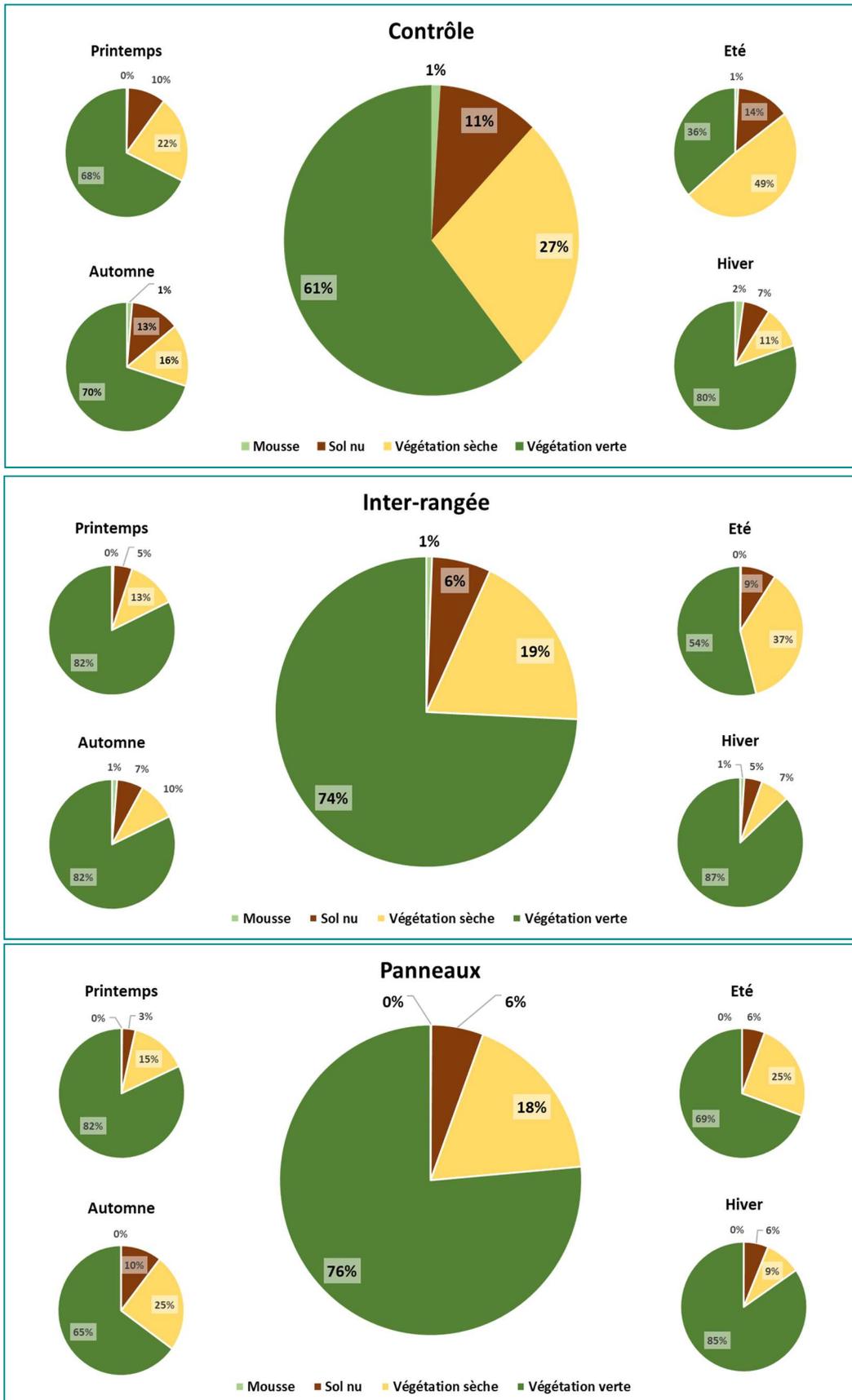


Figure 40 : Diagramme en secteurs de la qualité de la prairie (% sol nu et mousse visible, végétation sèche et verte) par traitement en moyenne annuelle sur deux ans et en fonction des saisons sur le site d'Églisottes.

## 2.3.5 Composition botanique des communautés végétales

### 2.3.5.1 Indices de dissimilarité

Pour savoir si les communautés végétales se distinguent les unes des autres en fonction des traitements, des indices de dissimilarités [3] ont été calculés sur les trois relevés botaniques effectués sur deux ans, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>). L'indice de dissimilarité de Sorensen [4] indique qu'il y a plus de différences entre les traitements qu'à l'intérieur d'un même traitement (Figure 41). L'Inter-rangée et les Panneaux présentent notamment plus de dissimilarités avec le Contrôle (CI $\beta_{SOR}$  = 0.54 ; CP $\beta_{SOR}$  = 0.54) qu'entre eux (IP $\beta_{SOR}$  = 0.41). L'indice indique que les Panneaux et l'Inter-rangée se ressemblent plus qu'ils ne sont différents (IP $\beta_{SOR}$  < 0.5).

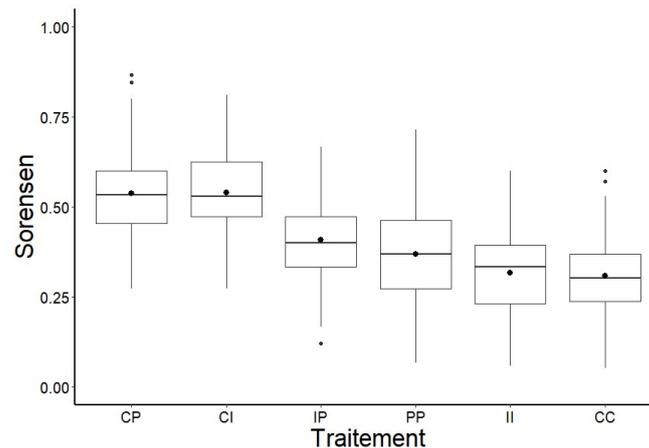


Figure 41 : Diagramme en boîte de l'indice de dissimilarité de Sorensen, sur le site d'Eglisottes, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

Cet indice de dissimilarité peut être décomposé en deux composantes : la nestedness, c'est-à-dire la perte ou le gain en espèces et le turn-over, c'est-à-dire le changement d'espèces. La composante nestedness ne représente qu'une faible part de la dissimilarité de l'ordre de 16 % en moyenne. Cette composante ne montre pas de différence entre traitements au sein d'un même traitement (Figure 42). Ce qui se retrouve aussi en regardant la richesse spécifique, en effet, en moyenne sur deux ans, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>), la richesse spécifique est statistiquement identique entre les traitements avec en moyenne 9 espèces/0.5m<sup>2</sup>.

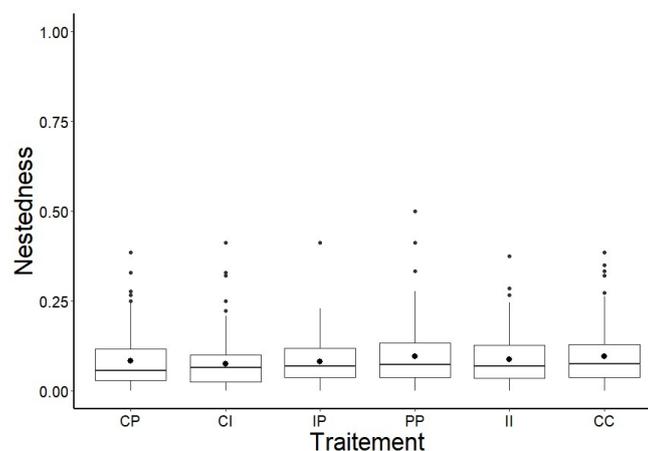


Figure 42 : Diagramme en boîte de la composante Nestedness, sur le site d'Eglisottes, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

Cependant, la majeure partie de la dissimilarité provient de la composante turn-over qui représente 84% de la dissimilarité entre les traitements. C'est-à-dire que la différence entre les traitements ne provient pas majoritairement d'une modification de la richesse spécifique, mais surtout d'un changement d'espèces. Les indices au sein d'un même traitement sont inférieurs aux indices inter-traitements, ce qui signifie qu'il y a une homogénéité des espèces présentes au sein de chaque traitement (Figure 43). Ceci montre que les différents traitements se démarquent bien entre eux, en ayant plus d'espèces différentes que d'espèces semblables. De plus, le Contrôle présente plus d'espèces différentes avec le Panneaux ( $CP\beta_{SIM} = 0.45$ ) et l'Inter-rangée ( $CI\beta_{SIM} = 0.47$ ) qu'entre ces deux derniers ( $IP\beta_{SIM} = 0.33$ ).

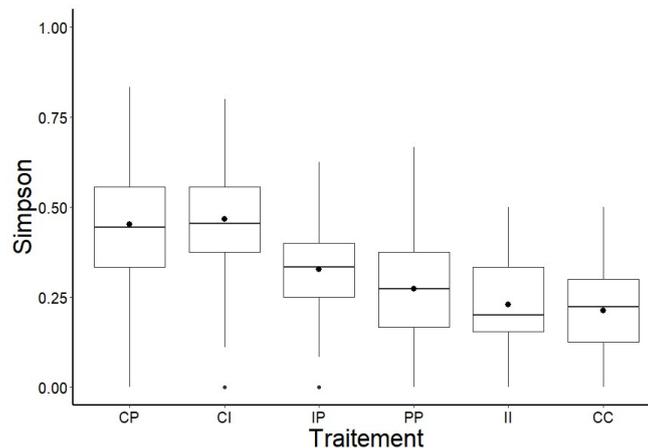


Figure 43 : Diagramme en boîte de la composante Turn-over avec l'indice de Simpson, sur le site d'Eglisottes, entre des sondes de même traitement (PP/II/CC) ou des sondes de traitements différents (CP/CI/IP). Le point noir à l'intérieur de la boîte représente la moyenne.

### 2.3.5.1 Comparaison des communautés végétales

Sur 36 espèces retrouvées sur deux ans au sein des quadrats suivis, 30 se retrouvent en Contrôle, 28 en Inter-rangée et 27 sous panneaux. Légèrement plus de la moitié des espèces est présente simultanément dans les trois traitements (Figure 44). Parmi les traitements, le Panneaux ne comptabilise aucune d'espèces exclusives, alors que le Contrôle présente cinq espèces qui lui sont spécifiques.

Pour visualiser la dissimilarité de la composition floristique entre traitements, une analyse en composantes principales (PCA) a été effectuée, dont les deux premiers axes représentent 21.42% de la variance totale, en prenant en compte les relevés botaniques sur 2 ans, à l'échelle de la sonde. Pour distinguer au mieux la différence qu'il peut y avoir entre les traitements, une BGA (Between Group Analysis) a été réalisée puis validée par un test de permutation et de « Cross-validation » avec une procédure « leave-one-out » [5]. Les résultats du test confirment la robustesse et la significativité de la représentation qui dissocient les différents traitements. Ainsi, comme représenté dans la figure 45 et calculé précédemment par l'indice de dissimilarité, les différents traitements se distinguent les uns des autres par leurs communautés végétales.

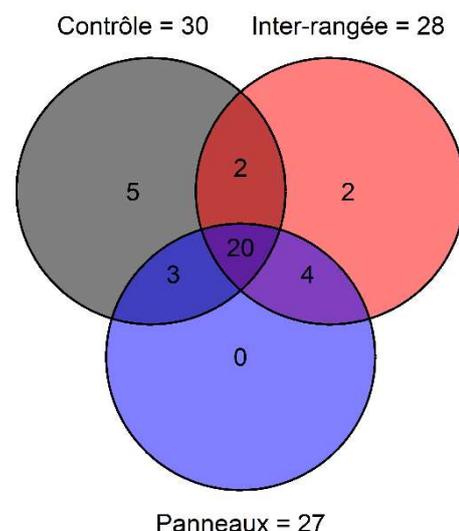


Figure 44 : Diagramme de Venn prenant en compte les 36 espèces présentes sur cinq relevés botaniques effectués sur le site d'Eglisottes.

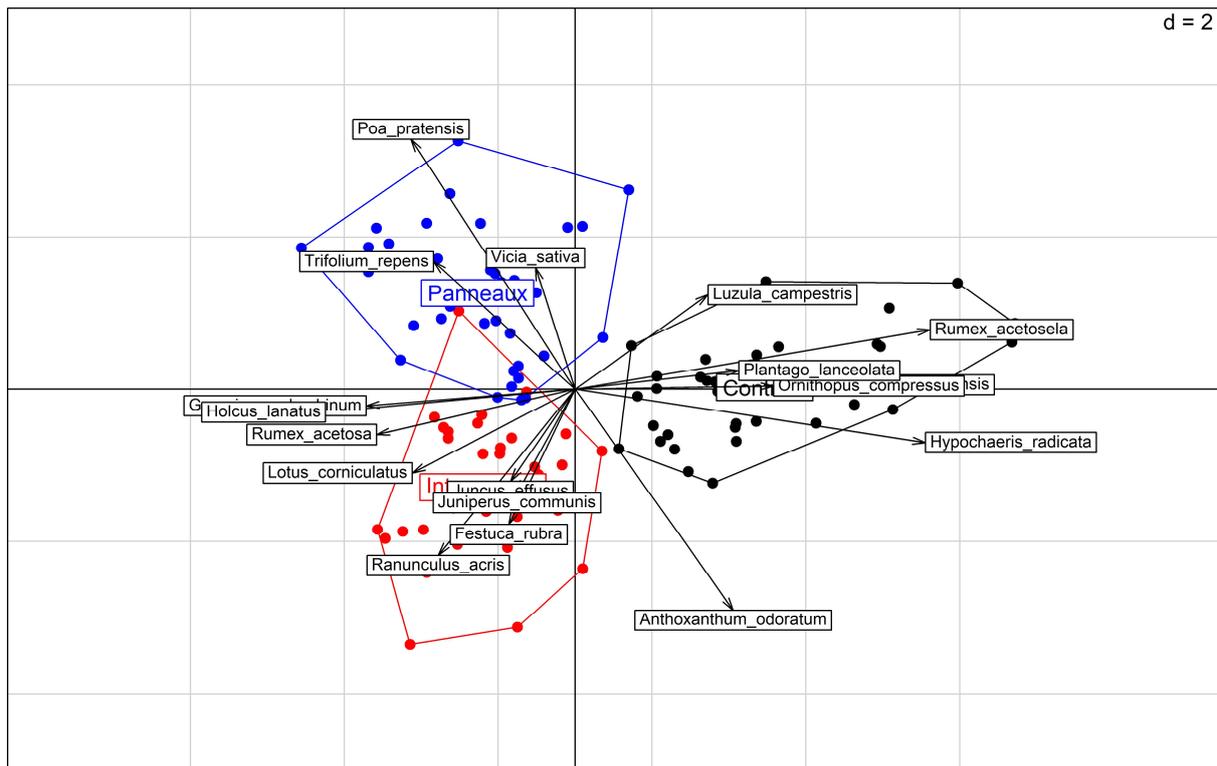


Figure 45 : Graphique de la Between Group Analysis (BGA) effectuée sur une analyse en composantes principales ayant les deux premiers axes portant 21.43% de la variance totale. Les données botaniques proviennent de trois relevés à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>) sur le site d'Eglisottes. Les espèces ont une contribution à l'axe 1 et 2 supérieures à la moyenne. Légende : Noir = Contrôle ; Rouge = Inter-rangée ; Bleu = Panneaux

Chaque traitement présente des espèces discriminantes, c'est-à-dire qu'elles participent le plus à la différenciation des traitements. Ces espèces sont représentées sur le graphique et listées dans le tableau 8 en présentant leur recouvrement moyen sur deux ans. On remarque que *Poa pratensis* est l'espèce la plus discriminante sous les panneaux, c'est une espèce avec une grande amplitude écologique et qui présente une bonne valeur fourragère. L'espèce la plus discriminante en Inter-rangée est *Ranunculus acris*, c'est une espèce commune dans les prairies fraîches ou humides, cependant, elle est sans intérêt fourragé et est peu broutée, car elle présente une substance toxique en étant fraîche [1]. En Contrôle, c'est *Rumex acetosella* qui est l'espèce la plus discriminante, cependant, cette espèce est indicatrice et prolifère sur des sols lessivés et pauvres, ce qui doit être le cas vu que son recouvrement est le deuxième plus important dans ce traitement (20%). L'espèce avec le plus fort taux de recouvrement en Contrôle est *Anthoxanthum odoratum*. C'est aussi le deuxième plus fort taux de recouvrement en Inter-rangée et elle permet de distinguer au mieux ces deux traitements recevant de la lumière directe de celui sous les panneaux à l'ombre. Effectivement, c'est une espèce avec une faible compétitivité et productivité, toxique à forte dose. Elle montre une dominance sur sol de très faible fertilité ce qui confirme la présence de *R. acetosella*. En Inter-rangée et en Panneaux, l'espèce avec le plus fort taux de recouvrement est *Arrhenaterum elatius*, c'est une espèce productive avec une valeur fourragère moyenne [1]. Elle ne montre pas forcément de dominance sur les autres espèces avec un indice d'équitabilité en moyenne à 0.73 dans chaque traitement, ce qui est aussi le cas de *A. odoratum* en Contrôle. L'indice de dissimilarité montre une ressemblance plus importante entre le Panneaux et l'Inter-rangée par rapport au Contrôle. L'espèce qui discrimine le plus I et P est *Holcus lanatus*. C'est une espèce à très grande amplitude écologique proliférant dans des milieux humides et ayant un potentiel élevé de production et une bonne valeur fourragère à l'état jeune.

Tableau 8 : Pourcentage de recouvrement moyen sur trois relevés floristiques sur le site d'Eglisottes pour les espèces ayant une contribution aux axes 1 et 2 de la BGA supérieures à la moyenne. Une case grisée indique que l'espèce est discriminante du traitement.

Traitement	Contrôle	Inter-rangée	Panneaux
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	25.89	24.36	8.11
<i>Arrhenatherum elatius</i>	18.07	29.36	27.40
<i>Aphanes arvensis</i>	1.99	0.00	0.00
<i>Festuca rubra</i>	0.14	2.22	0.00
<i>Geranium columbinum</i>	0.04	2.36	2.19
<i>Holcus lanatus</i>	0.08	5.15	4.72
<i>Hypochaeris radicata</i>	11.18	2.63	0.76
<i>Juncus effusus</i>	0.00	1.25	0.14
<i>Juniperus communis</i>	0.00	0.21	0.00
<i>Lotus corniculatus</i>	2.81	7.05	5.15
<i>Luzula campestris</i>	2.07	0.00	1.18
<i>Ornithopus compressus</i>	1.67	0.00	0.00
<i>Plantago lanceolata</i>	0.64	0.00	0.07
<i>Poa pratensis</i>	0.00	0.89	21.58
<i>Ranunculus acris</i>	0.14	2.22	0.53
<i>Rumex acetosa</i>	0.83	5.16	4.21
<i>Rumex acetosella</i>	20.06	0.14	3.36
<i>Trifolium repens</i>	0.25	1.00	2.79
<i>Vicia sativa</i>	1.81	1.43	3.01

Sur deux ans avec trois relevés, à l'échelle de la sonde (0.5m<sup>2</sup>), les Poacées montrent une espèce de plus sous les Panneaux et en l'Inter-rangée que sous le Contrôle (I = 3.4, P = 3.4, C = 2.4). Le recouvrement des Poacées est aussi 1.3 fois plus élevé sous les Panneaux et en Inter-rangée (P = 69.71 %, I = 69.94 % ; C = 52.14 %). Pour les Fabacées, le Panneaux présente statistiquement plus souvent des quadrats avec plus d'espèces de Fabacées que les autres traitements, bien que la moyenne soit objectivement similaire (I = 1.6, P = 2.2, C = 1.8). Le recouvrement des Fabacées est 1.7 fois plus important sous les panneaux et tend à être 1.5 fois plus important en Inter-rangée par rapport au Contrôle (C = 6.5 %, I = 9.5 %, P = 11 %). En ce qui concerne les espèces diverses autres que les Fabacées et Poacées, il y a une à deux espèces en plus en Contrôle (C = 5.3 ; I = 3.9 ; P = 3.6) et un recouvrement 2 à 2.1 fois plus important qu'en Inter-rangée et Panneaux (I = 20.6 %, C = 41.4 %, P = 19.3 %).

Sur le site d'Eglisottes, les communautés végétales de chaque traitement se distinguent les unes des autres essentiellement par une modification des espèces et non par un changement du nombre d'espèces. La richesse spécifique est similaire entre les traitements. Néanmoins, le pool d'espèces retrouvé sous les panneaux est légèrement plus faible. Bien que la moitié des espèces soit présente dans chaque traitement le Panneaux n'a aucune espèce exclusive. L'Inter-rangée et le Panneaux présentent la même espèce avec le plus fort taux de recouvrement, c'est *Arrhenaterum elatius*. Cette espèce n'est pas jugée ayant un côté dominant sur les autres espèces au sein des traitements et présente une bonne production et une valeur fourragère moyenne. En Contrôle, il s'agit d'*Anthoxanthum odoratum* qui a une productivité faible et abondante sur sol peu fertile, mais qui n'est pas non plus jugée dominante. D'après les indices de dissimilarités, les communautés végétales sous les Panneaux et en Inter-rangée ont plus de points communs que de différences. Elles se distinguent du Contrôle notamment par *Holcus lanatus* qui est une espèce productive et de bonne valeur fourragère au stade jeune. A l'opposé, le Contrôle se distingue le plus par *Rumex acetosella* qui est typique et proliférante sur des sols dégradés. Cette différenciation de communauté végétale peut expliquer la plus forte production de biomasse en Inter-rangée et Panneaux par rapport au Contrôle. Cette différence de cumul de biomasse peut aussi être expliquée par un recouvrement plus important de poacées et de fabacées dans ces traitements sous influence des panneaux solaires.

La présence de panneaux solaires a modifié la composition botanique sur le site. Ceci induit des modifications sur la production de biomasse mais aussi sur sa qualité. Néanmoins, certaines espèces sont présentes dans les trois traitements ce qui peut nécessiter une adaptation physiologique aux différentes conditions.

## 2.3.6 Morphologie des feuilles

### 2.3.6.1 Surface foliaire spécifique (SLA)

La surface foliaire spécifique pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 57% et 93% plus grande pour la végétation sous les panneaux que celle en Contrôle et en Inter-rangée (Tableau 9). La SLA en Contrôle est aussi 23% plus grande qu'en Inter-rangée.

Tableau 9 : Moyenne pondérée de la SLA, LDMC et de la densité des stomates par le pourcentage de recouvrement en moyenne sur trois relevés des espèces échantillonnées présentes dans les trois traitements simultanément sur Eglisottes.

Traitement	Recouvrement (%)	SLA pondérée (cm <sup>2</sup> /g)	LDMC pondérée (g/g)	Densité stomatique pondérée (nb mm <sup>-2</sup> )
Contrôle	86.85	199.47	0.223	61.19
Inter-rangée	69.44	161.78	0.439	61.34
Panneaux	49.65	312.83	0.350	57.75

### 2.3.6.1 Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)

La teneur en matière sèche des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté est 25% et 97% plus importante en Inter-rang par

rapport à celle de la végétation sous les panneaux et en Contrôle, respectivement (Tableau 9).

### 2.3.6.2 Densité stomatique

La densité stomatique des feuilles pondérée par rapport aux recouvrements des espèces échantillonnées à l'échelle de la communauté ne semble pas différer entre les traitements (Tableau 9).

Sur le site d'Eglisottes, en comparant les mêmes espèces dans chaque traitement, une plasticité morphologique est observée entre les traitements. La surface foliaire spécifique est 1.6 et 1.9 fois plus grande à l'ombre sous les panneaux qu'en Contrôle et en Inter-rangée. Ceci signifie que pour un même poids, les feuilles sont plus grandes et plus fines sous les panneaux. Ce qui est en cohérence avec la relation entre la biomasse et la croissance en hauteur entre la végétation sous les panneaux et celle en Inter-rangée. Les deux traitements ont le même cumul de biomasse, mais avec une croissance supérieure sous les panneaux.

Entre l'Inter-rangée et le Contrôle, c'est surtout la différence de LDMC qui est 2 fois plus important en Inter-rangée, ce qui explique cette différence de relation. Effectivement, pour un même poids frais, la végétation en Inter-rangée possède plus de matière sèche ce qui se reflète dans le cumul de biomasse. D'autant plus que pour un même poids sec, les feuilles en Contrôle sont légèrement plus hautes et fines ce qui accentue cette différence.

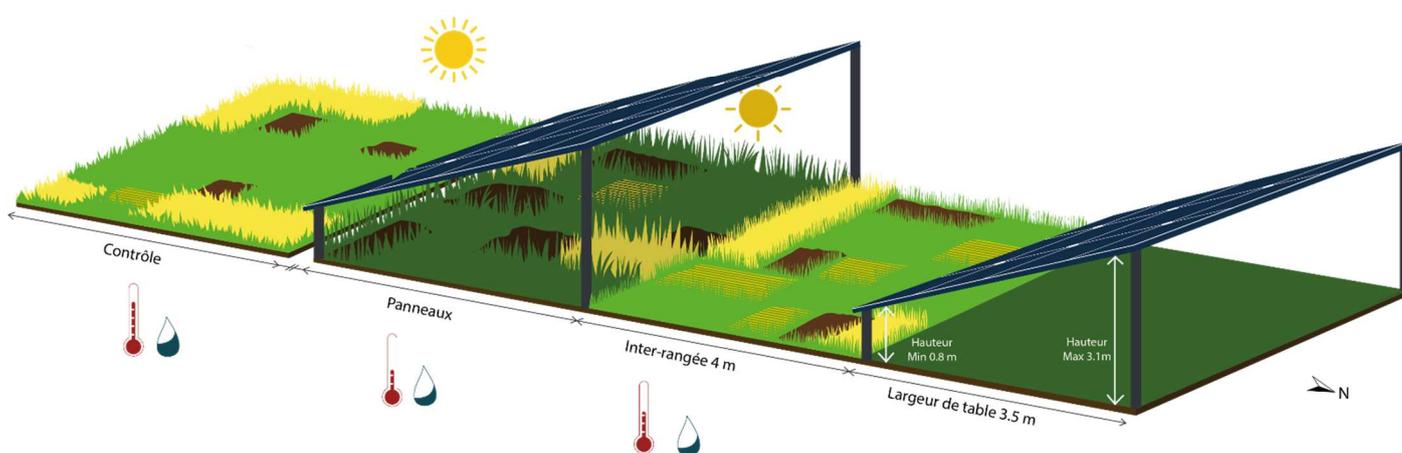
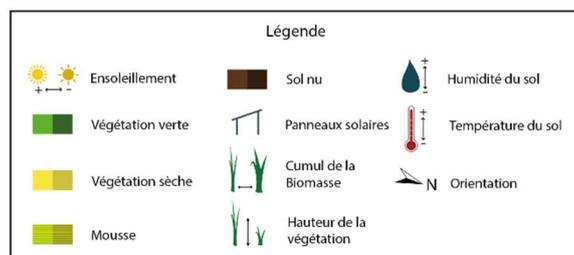
Il y a donc un fort étiolement sous les panneaux et une augmentation de l'efficacité d'interception de la lumière avec l'ombre. La végétation en Inter-rangée perçoit quotidiennement d'Est en Ouest, un rayonnement aussi important qu'en Contrôle ce qui ne semble pas l'obliger à s'adapter morphologiquement à l'ombre. De plus, l'intensité de rayonnement n'étant pas aussi important tout au long de la journée et le sol n'étant pas limitant en eau au contraire du Contrôle, la végétation semble pouvoir produire plus de matière sèche et moins stocker d'eau dans ses feuilles.



## 3 RESUME

### 3.1 BRAIZE

Illustration des résultats moyens sur deux ans (2020-2021 et 2022) sur le site agrivoltaïque de Braize  
\*Végétation coupée en exclos chaque mois



© Perrine\_BRASSIER\_INRAE\_UREP

Sur le site de Braize, en plaine sur un sol sableux et de remblais, mis en service depuis fin 2018 et provenant d'un terrain anthropisé par une pépinière, les panneaux ont un effet parapluie et parasol important. Néanmoins, la végétation, à l'ombre, produit le plus de biomasse en moyenne sur deux ans, mais celle-ci est fortement limitée et pourrait être plus importante, à cause, de l'état de la prairie et la réduction de la densité en herbacées visible par la quantité sol nu. Cette plus grande quantité de biomasse sous les panneaux, qui n'est pas observable chaque année et qui reste mince à la vue de la faible productivité globale de la prairie, est expliquée par un changement de communauté végétale avec des espèces plus productives et de meilleure qualité fourragère. Bien que l'ombre des panneaux, sur ce site sableux et sec, permet le développement de meilleures espèces pour le pâturage, il y a un appauvrissement d'espèces essentielles aux prairies avec une réduction des Fabacées. Ces dernières ne présentent pas une plasticité suffisante à ce taux d'ombrage pour s'adapter physiologiquement. Les espèces présentes montrent une modification de la morphologie de leurs feuilles en optimisant la captation de la lumière. Cependant, cette plus grande croissance en hauteur à l'ombre n'est pas corrélée avec la biomasse puisque les feuilles possèdent moins de matière sèche. Une deuxième réponse à l'ombrage concerne la qualité fourragère de la végétation qui est plus riche en protéines grâce à une teneur en azote totale plus importante pour optimiser l'interception du rayonnement. Cette teneur en azote est d'autant plus différente des autres traitements par la réduction de

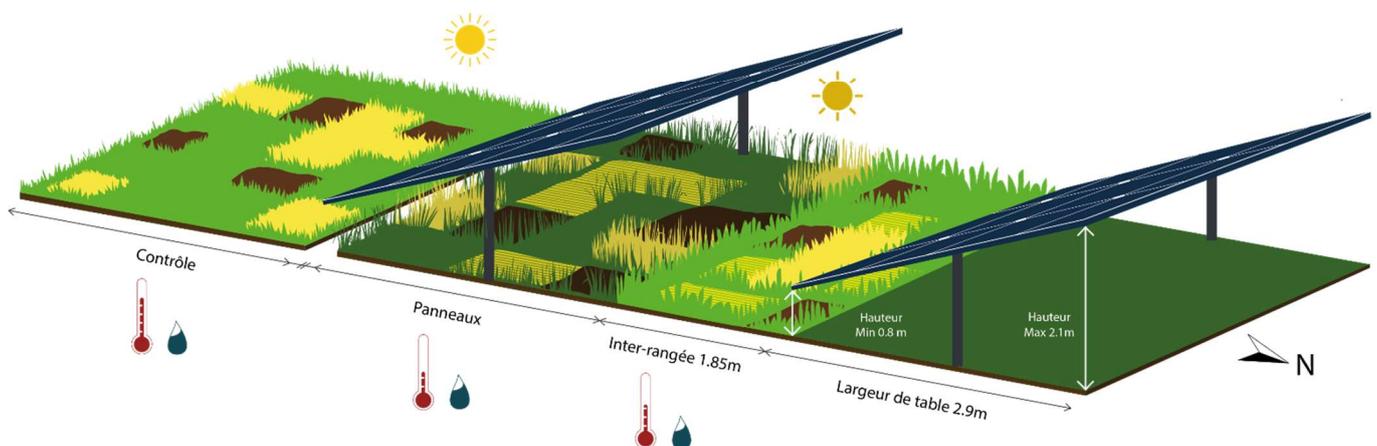
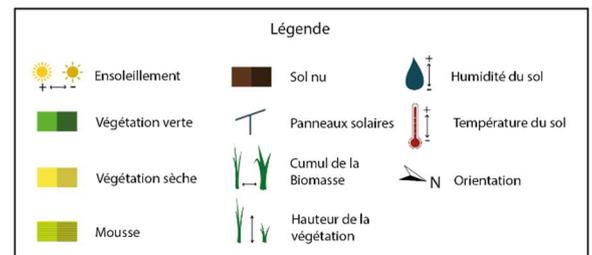
rayonnement en gardant une proportion de végétation plus verte durant la période estivale. La végétation à l'ombre en période estivale est moins impactée par le climat chaud et sec grâce à la réduction de la densité stomatique ce qui limite la transpiration.

L'Inter-rangée est aussi impactée, en moindre mesure, par l'effet parasol des panneaux, cependant, c'est entre les rangées que, sur le site de Braize, la production de biomasse est la plus faible. Bien que la communauté végétale diffère avec celle du contrôle, les deux zones présentent une végétation plutôt de milieux secs et avec un faible intérêt fourrager. La végétation en Inter-rangée possède une teneur en matière sèche supérieure à celle du contrôle pour une même surface de feuilles ainsi qu'une croissance en hauteur équivalente, la biomasse devrait donc être plus importante. Ce qui n'est pas le cas à cause d'une densité végétale réduite en Inter-rangée visible par la quantité de mousse.

### 3.2 MARMANHAC

Illustration des résultats moyens sur deux ans (2020-2021 et 2022) sur le site agrivoltaïque de Marmannhac

\* Végétation coupée en exclos chaque mois



© Perrine\_BRASSIER\_INRAE\_UREP

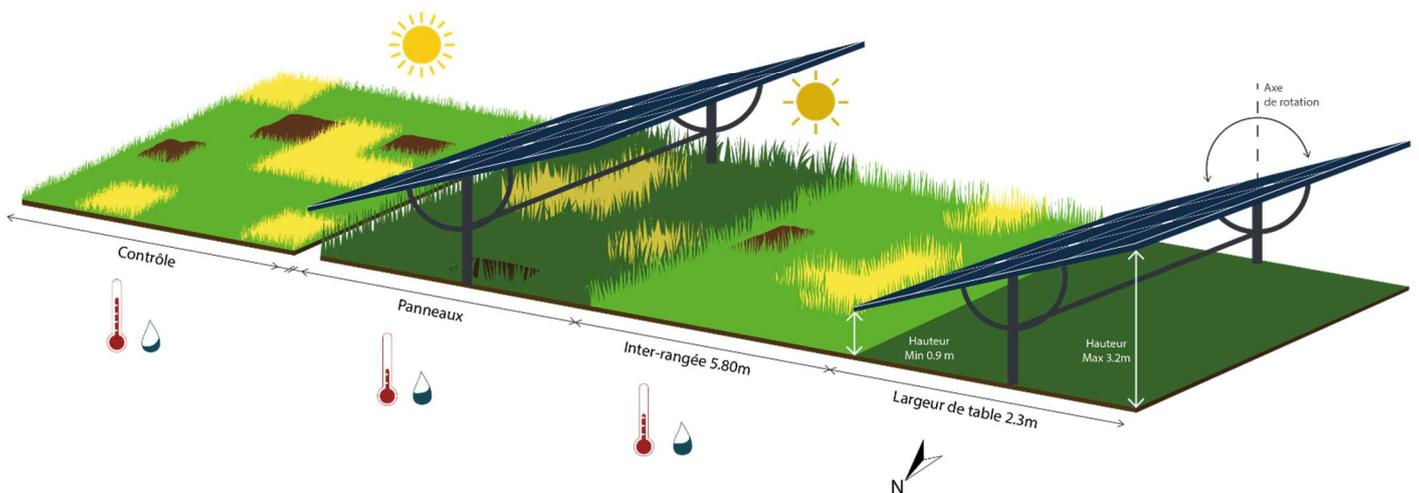
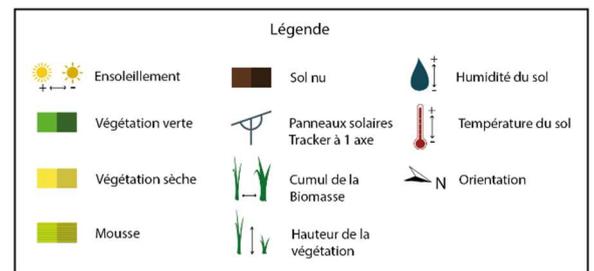
Sur le site de Marmanhac, en moyenne montagne sur un andosol riche en matières organiques et limono-sableux, mis en service depuis début 2014 et provenant d'une ancienne prairie abandonnée devenue friche, les panneaux ont un effet parapluie et parasol important. Ceci impacte la végétation, à l'ombre, qui produit le moins de biomasse. Effectivement, celle-ci est limitée et pourrait être plus importante, à cause, de la qualité de la prairie et de la réduction de la densité en espèces herbacées, visible par la quantité de mousse. Cette plus faible quantité de biomasse sous les panneaux n'est pas expliquée par le changement de communauté végétale. Bien que la communauté végétale présente

moins d'espèces et notamment moins de recouvrement d'espèces essentielles aux prairies appartenant aux Fabacées. Ces dernières ne présentent pas une plasticité suffisante à ce taux d'ombrage pour s'adapter physiologiquement. Les espèces s'adaptant montrent une modification de la morphologie de leurs feuilles en augmentant la surface d'interception du rayonnement et la hauteur sous les panneaux. Cependant, cette plus grande croissance en hauteur à l'ombre (étiolement) n'est pas corrélée avec la biomasse puisque les feuilles possèdent moins de matières sèches. De plus, c'est pour cela que pour une même réduction en espèces herbacées et une même croissance avec l'Inter-rangée, la biomasse cumulée sous les panneaux est plus faible. Une deuxième plasticité à l'ombrage joue sur la qualité fourragère de la végétation qui est plus riche en protéines grâce à une teneur en azote totale plus importante pour optimiser l'interception du rayonnement. Cette teneur en azote est d'autant plus différente des autres traitements par la réduction de rayonnement en gardant une proportion de végétation plus verte durant la période estivale. Enfin, les panneaux influençant le microclimat viendraient induire une hydromorphie du sol à l'ombre, d'autant plus que la végétation présente une transpiration plus faible en lien avec la densité stomatique réduite. Ceci limiterait le potentiel de production des espèces présentes et ouvre une niche écologique à des espèces indésirables au pâturage telle que la fougère aigle.

### 3.3 EGLISOTTES

Illustration des résultats moyens  
sur deux ans (2022 et 2023)  
sur le site agrivoltaïque des Eglisottes

\* Végétation coupée en exclos chaque mois



© Perrine\_BRASSIER\_INRAE\_UREP

Sur le site d'Eglisottes, en plaine alluviale avec un sol sablo-limoneux, mis en service fin 2017 et provenant d'une friche depuis 10 ans avant son installation, les panneaux ont un effet parapluie et parasol important. Néanmoins, la végétation sous l'influence des panneaux solaires (Inter-rangée et Panneaux), produit le plus de biomasse. Cette différence de production de biomasse n'est pas influencée par la qualité de la prairie qui est similaire dans chaque traitement. De plus, l'ombre des panneaux permet de garder plus longtemps de l'herbe verte durant les périodes estivales. Cette plus grande quantité de biomasse sous les panneaux et entre les rangées est expliquée par un changement de communauté végétale avec des espèces plus productives et de meilleure valeur fourragère. En Contrôle, les espèces sont typiques de prairies dégradées. Néanmoins, la richesse spécifique n'est pas impactée par les panneaux solaires. De plus, le recouvrement en Fabacées est plus important avec l'ombre des panneaux. Entre les traitements, les espèces s'adaptant au microclimat, montrent une modification de la morphologie de leurs feuilles en augmentant la surface d'interception du rayonnement et la hauteur sous les panneaux. Cependant, cette plus grande croissance en hauteur à l'ombre (étiolement) n'est pas corrélée avec la biomasse puisque les feuilles possèdent moins de matière sèche. Cette modification morphologique explique qu'entre la végétation sous les panneaux et celle entre les rangées, qui ont toutes deux le même cumul de biomasse et la même densité en herbacées, celle sous les panneaux a une croissance supérieure. Enfin, la végétation en Inter-rangée perçoit quotidiennement d'Est en Ouest, un rayonnement aussi important qu'en Contrôle ce qui ne se traduit pas par une plasticité morphologique à l'ombre. De plus, l'intensité de rayonnement n'étant pas aussi importante tout au long de la journée et le sol n'étant pas limitant en eau au contraire du Contrôle, la végétation semble pouvoir produire plus de matière sèche et stocker moins d'eau dans ses feuilles.

## 4 CONCLUSIONS GENERALES

---

Tout d'abord, les résultats obtenus proviennent de prairies non fertilisées qui ont été en friche de nombreuses années pour Marmanhac et Eglisottes ou proviennent d'une réhabilitation de terrain pour Braize. Donc, ces résultats ne sont pas comparables à des parcs agrivoltaïques installés sur des prairies restées en activité et/ou fertilisées. Ainsi, l'agrivoltaïsme sur ces terrains ne peut être que bénéfique pour éviter la déperdition des terres agricoles et relancer une activité sur ces terrains. Néanmoins, sur ce genre de terrains, même au regard de l'historique du site, l'activité agricole doit être considérée comme activité principale face au photovoltaïque.

De plus, les résultats microclimatiques obtenus en agrivoltaïsme pastoral ne sont pas comparables à ceux obtenus en agrivoltaïsme sur des champs par exemple. Effectivement, la hauteur des panneaux est bien différente. Les panneaux sont « au sol » pour l'agrivoltaïsme pastoral alors qu'ils sont à plusieurs mètres de hauteur pour laisser passer des tracteurs dans d'autres types d'agrivoltaïsme. La largeur des panneaux est aussi différente. Cette forte modification de l'infrastructure impacte forcément les variables microclimatiques et augmente les contrastes dans le système en pastoral. Effectivement, les études en agrivoltaïsme pastoral considèrent généralement trois zones du parc (Inter-rangée/Panneaux/Contrôle) alors que les études en agrivoltaïsme disposant de panneaux en hauteur ne considèrent généralement que deux zones du parc (Panneaux/Contrôle). C'est pourquoi, l'empreinte au sol ne peut être comparée de la même façon.

Enfin, la comparaison entre études se doit de rester objective entre des suivis sur des parcs de plusieurs d'hectares et des sites expérimentaux inférieurs à un hectare. Effectivement, les premières rangées de parcs sont probablement soumises à l'effet bordure que ce soit en matière de rayonnement, d'inertie thermique, de précipitations passant sous les panneaux, du vent et notamment de la dispersion de graines pour la colonisation des espèces.

Suite à ce travail, des questions se posent sur l'extrapolation des résultats obtenus sur deux ans de suivi sur les autres parcs. Effectivement, certaines variables primordiales à l'activité agricole diffèrent entre les sites étudiés bien que d'autres variables réagissent de la même façon. Par exemple, concernant les variables microclimatiques, le rayonnement ainsi que les précipitations et la température du sol diminuent sous les panneaux solaires, mais l'humidité du sol n'est pas affectée de façon équivalente entre les parcs. En effet, cette variable dépend essentiellement de la granulométrie et texture du sol, de la pédologie et topographie du site, de l'historique du site et de l'intensité des perturbations liés aux travaux d'installation, mais aussi du type d'infrastructure et de leur dimension. Tout ceci diffère énormément d'un site à l'autre. Concernant les variables biologiques, la croissance est supérieure et la végétation sèche moins importante avec l'ombrage, cependant, cela ne se reflète pas dans la production de biomasses qui ne réagit pas entre les traitements de la même façon sur les trois sites suivis. Cette production de biomasses qui est la variable biologique primordiale et attendue dans une activité agricole est influencée et dépend de pleins d'autres variables telles que la densité herbacée et la qualité de la prairie, mais aussi des communautés végétales présentes.

- ⇒ C'est pourquoi, il est important d'effectuer des études sur de nombreux sites avec plus ou moins de ressemblance (climat, pédologie, infrastructure) pour connaître les facteurs bénéfiques et ceux néfastes pour l'activité agricole dans le but de connaître notamment les infrastructures et leur dimension impactant le moins possible les prairies en fonction de leur caractéristique propre (climat, pédologie) pour former un système agrivoltaïque vertueux. La cohérence de la comparaison des résultats provenant de différents suivis en lien avec le protocole expérimental mis en place est un point de vigilance auquel il faut faire attention.

D'autres questions se posent sur l'extrapolation des résultats obtenus sur deux ans de suivi sur le long terme (échelle temporelle des parcs). Effectivement, à l'échelle d'une durée de vie d'un parc agrivoltaïque (25-30 ans) et du temps nécessaire à la végétation (Time-lag effect, dette d'extinction) et au sol pour répondre à des perturbations, deux ans de suivi correspondent à du très court terme. Cette étude ne permet pas de savoir d'où viennent les parcs ni vers quelle évolution ils vont. C'est pourquoi des questions sur les communautés végétales en ressortent. Effectivement, la diversité biologique est le support des services rendus par les écosystèmes tels que les prairies. La baisse du nombre d'espèces avec l'ombrage (constaté sur deux des trois parcs suivis) pourrait réduire ces services dont le principal est la séquestration de carbone via les processus de minéralisation/décomposition de la matière organique du sol. De plus, les plantes prairiales pourraient, à l'ombre, respirer plus qu'elles ne font de photosynthèse ce qui changerait localement les prairies, sous les panneaux, de puits de carbone à source de carbone ou du moins atténuer cet effet positif dans un contexte de changement climatique. Cette réduction de richesse spécifique, va-t-elle s'amplifier sur la durée de vie des parcs ? La prairie sous les panneaux, pourra-t-elle être colonisée par des espèces fourragères et adaptées à l'ombrage ? Avec les filtres abiotiques créés par les panneaux (ombrage, réduction des précipitations...) et la réduction de la richesse spécifique, une réduction importante de la densité prairiale est constatée sur deux des trois parcs suivis. Effectivement, les panneaux solaires sont des contraintes pour la colonisation du sol par les espèces prairiales adaptées à la lumière. De plus, les infrastructures pourraient aussi être impliquées dans la limitation de la colonisation du sol nu en jouant le rôle de barrière physique pour les graines, probablement proportionnellement à la taille du parc. Néanmoins, nous ne pouvons pas argumenter en détail sur la quantité de sol nu présente sur certains sites. Effectivement, nous ne savons pas si cela était déjà le cas juste après les travaux ou s'il est apparu progressivement. Le devenir de l'état de la prairie sur le long terme est donc questionné pour savoir si un parc sujet à une réduction de densité herbacée va voir le sol nu augmenter jusqu'à présenter une absence totale de la végétation à l'ombre, rester stable ou être recolonisé par une ou des espèces. Sur deux des trois parcs suivis, il n'y a que quelques espèces uniquement présentes sous les panneaux. Cependant, comme sur Marmanhac, certaines espèces passant les filtres abiotiques créés par les panneaux sont indésirables au pâturage comme la fougère

aigle ou le jonc. Le microclimat et le sol nu présents sous les panneaux ont contribué à créer une niche écologique disponible et favorable à ces espèces. Enfin, sur les trois sites suivis, uniquement le site le plus ancien montre un cumul de biomasse plus faible sous les panneaux. Cet effet est ponctuel et observé sur un très court temps. La production de biomasse, va-t-elle diminuer pour les autres sites ? En plus de la réduction de la densité prairiale impactant le cumul de biomasse, la réduction en recouvrement et en nombre d'espèces de Fabacées est constatée sur deux des sites. Les Fabacées sont généralement des espèces non-tolérantes à l'ombre et fixatrices d'azotes atmosphériques. Ceci questionne sur la fertilité du sol à l'ombre sur des pas de temps long. La fertilité du sol notamment en azote, va-t-elle diminuer dans le temps ? Et d'autant plus vite que la végétation sous les panneaux, pour compenser la réduction de lumière, augmente sa teneur en azote foliaire pour optimiser la photosynthèse.

- ⇒ C'est pourquoi, il est important d'effectuer des études sur de nombreux sites avec plus ou moins de ressemblance (climat, pédologie, infrastructure) pour connaître les facteurs bénéfiques et ceux néfastes pour l'activité agricole dans le but de connaître notamment les infrastructures et leur dimension impactant le moins possibles les prairies en fonction de leur caractéristique propre (climat, pédologie) pour former un système agrivoltaïque vertueux à long terme. La cohérence de la comparaison des résultats provenant de différents suivis en lien avec le protocole expérimental mis en place est un point de vigilance auquel il faut faire attention.

Les résultats observés dans cette étude ne permettent pas de trancher sur la viabilité à long terme des prairies dans un système agrivoltaïque. Sur deux ans de suivi, bien que le cumul de biomasse dans les zones sous influence des panneaux solaires soit neutre ou supérieur à la zone en plein soleil. Les effets négatifs sur la qualité de la prairie et sur les communautés végétales notamment dans les parcs ayant des infrastructures de panneaux fixes au sol amènent à penser que le système agrivoltaïque doit être perfectionné. Nous nous permettons d'ouvrir quelques pistes de réflexion pour ces types d'infrastructures. Ne pourrait-on pas améliorer l'état de la prairie et sa production de biomasse si le rayonnement était légèrement augmenté sous les panneaux ? L'idée serait de maintenir de l'ombre qui est inévitablement provoquée par les panneaux et qui est également bénéfique pour la prairie et les ovins, mais jusqu'à quelle intensité ? Les premiers travaux de modélisation montrent qu'une réduction de 50% de lumière pourrait limiter les stress printaniers et estivaux tout en maintenant une production de biomasse [7]. Réduire la densité de panneaux par l'augmentation significative des interstices entre les panneaux pourrait être une proposition. Un tel agencement engendrerait forcément moins de production énergétique solaire, mais pérenniserait les terres agricoles et la bonne santé des sols et des systèmes prairiaux. Cela permettrait d'augmenter la lumière qui atteint les plantes et le sol, augmentant ainsi la transpiration permettant de limiter les situations de sols hydromorphes comme sur le site de Marmanhac. Limitant ainsi les impacts négatifs d'un sol trop humide en matière d'espèces indésirables ou de stress limitant le développement des espèces prairiales. Une plus grande luminosité sous les panneaux permettrait également de réduire la compétition pour cette ressource, limitant ainsi la dominance d'une espèce sur les autres. Cela offrirait l'opportunité d'un meilleur développement d'espèces favorables indispensables au bon fonctionnement de la prairie et de sa fertilité. De plus, si l'espace entre les panneaux est augmenté, davantage de précipitations pourraient être disponibles pour les plantes, au lieu de ruisseler sur les côtés, ce qui serait avantageux sur des sites secs comme Braize. En maintenant un niveau d'ombrage suffisant, les effets bénéfiques de l'ombrage seraient préservés, comme la protection de la végétation contre les conditions estivales intenses et la diversification de la qualité du fourrage avec une végétation plus riche en azote et un peu plus fibreuse. Une autre option serait de réduire nettement la largeur des tables sans resserrer les inter-rangées. Ceci permettrait d'augmenter l'effet bordure, ce qui diminuerait les contrastes de réduction d'ensoleillement et de répartition des pluies.

Enfin, les performances zootechniques des fermes présentes sur les sites ne sont pas disponibles pour savoir si la quantité et la qualité du fourrage produites sur ces sites agrivoltaïques permet de gagner en autonomie alimentaire et économique, comparé à l'élevage à l'herbe sur prairie permanente sans panneaux solaires.

### Limites de l'étude

Cette étude présente des limites. 1) Il aurait été utile de pouvoir commencer les suivis ou d'avoir des relevés pré et post construction pour connaître l'évolution des prairies. De plus, notre protocole d'étude voulait montrer le potentiel de la végétation et le microclimat sous différents traitements au sein d'un parc agrivoltaïque. 2) Nous avons dû localiser nos suivis sur une petite surface pour instrumenter le site et suivre la végétation proche de nos capteurs vis-à-vis de l'échelle des parcs. Les résultats obtenus peuvent être différents à d'autres endroits dans les sites. Cependant, nous avons essayé d'éviter les rangées en bord de parc pour minimiser l'effet bordure. 3) Le pas de temps des suivis est mensuel, ce qui implique de faucher la repousse de la végétation chaque mois. Cette fauche intensive peut induire des effets sur la productivité en affaiblissant la végétation dans nos quadrats et impacter négativement les espèces non-résistantes aux perturbations fréquentes. Néanmoins, chaque traitement présente la même intensité d'échantillonnage et nous avons changé de quadrats d'une année sur l'autre pour minimiser cet effet. Une végétation ayant le temps de pousser plus longtemps peut répondre différemment si la végétation atteint un seuil de productivité dû à la limitation des ressources ou si la végétation est plus lente à répondre dans un des traitements. 4) L'absence de zone témoin à l'extérieur du parc (sur un même sol et même végétation) ne permet pas de comparer la prairie en agrivoltaïsme par rapport à une prairie à ciel ouvert. Effectivement, les trois traitements au sein du parc ont subi les perturbations liées aux travaux. Nous ne pouvons pas exclure l'hypothèse que nos contrôles pourraient présenter plus de tassement du sol. Effectivement, ils sont proches du portail d'entrée et/ou proche d'un chemin. Ainsi, le contrôle ne correspond pas à un témoin sans perturbation liée à l'agrivoltaïsme.

### Bibliographie :

- [1] P. Pierre and F. Hubert, *Guide pour un diagnostic prairial*, Chambre d'Agriculture Pays de la Loire. 2003.
- [2] J. P. Grime, J. G. Hodgson, and R. Hunt, *Comparative Plant Ecology*, 2nd ed. Castlepoint Press, 2007.
- [3] A. Baselga and C. D. L. Orme, 'betapart : an R package for the study of beta diversity: *Betapart package*', *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, no. 5, pp. 808–812, Oct. 2012, doi: [10.1111/j.2041-210X.2012.00224.x](https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2012.00224.x).
- [4] A. Baselga, 'Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity: Partitioning beta diversity', *Global Ecology and Biogeography*, vol. 19, no. 1, pp. 134–143, Jan. 2010, doi: [10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x](https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x).
- [5] J. Thioulouse, S. Renaud, A.-B. Dufour, and S. Dray, 'Overcoming the Spurious Groups Problem in Between-Group PCA', *Evol Biol*, vol. 48, no. 4, pp. 458–471, Dec. 2021, doi: [10.1007/s11692-021-09550-0](https://doi.org/10.1007/s11692-021-09550-0).
- [6] Plateforme de connaissance de l'Association pour le Développement de la Culture Fourragère (ADCF), Connaitre les plantes des prairies, caractéristiques par espèce, fougère aigle ; <https://www.eagff.ch/fr/connaitre-les-plantes-des-prairies/autres-plantes/caracteristiques-par-espece/fougere-aigle>, visité le 16/08/2023
- [7] Blaise M. 2023. Etude de la pousse de l'herbe dans des parcs agrivoltaïques par simulation et expérimentation. Stage Master 2, Master AETPF - mention BICG, Université Orléans.