



**HAL**  
open science

## Synthèse de la dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques et du pâturage sur deux sites prairiaux pâturés. Etude des effets sur une période annuelle.

Loan Madej, Luc Michaud, Cyrille Bouhier de L'Ecluse, Christophe Cogny, Marilyn Roncoroni, David Colosse, Robert Falcimagne, Sophie Jacquot, Catherine Picon-Cochard

### ► To cite this version:

Loan Madej, Luc Michaud, Cyrille Bouhier de L'Ecluse, Christophe Cogny, Marilyn Roncoroni, et al.. Synthèse de la dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques et du pâturage sur deux sites prairiaux pâturés. Etude des effets sur une période annuelle.. [Rapport de recherche] INRAE. 2022. hal-03592786

**HAL Id: hal-03592786**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03592786>**

Submitted on 1 Mar 2022

**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.

Public Domain

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

## Etude des effets de juillet 2020 à juin 2021

Synthèse des travaux

### INRAE-Photosol-JPee



Madej Loan<sup>1</sup>, Michaud Luc<sup>1</sup>, Colosse David<sup>1</sup>, Falcimagne Robert<sup>1</sup>, Roncoroni Marilyn<sup>1</sup>, Cogny Christophe<sup>3</sup>, Jacquot Sophie<sup>2</sup>, Bouhier de l'Ecluse Cyrille<sup>2</sup>, Picon-Cochard Catherine<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAE, VetAgro Sup, UREP, 63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> PhotoSol, 75008 Paris, France

<sup>3</sup> JPee, 44200 Nantes, France

Février 2022



## Sommaire

<b>Contexte</b> .....	2
<b>Objectifs</b> .....	3
<b>Méthodes</b> .....	3
<b>Conclusions Principales</b> .....	4
<b>Synthèse de l'influence de la présence des panneaux solaires sur la dynamique prairiale en fonction des saisons</b> .....	7
<b>Milieu d'été - Effet de la sécheresse</b> .....	7
<b>De la sécheresse au début d'automne – Regain de la végétation</b> .....	11
<b>Fin de l'hiver – Arrêt de la croissance</b> .....	15
<b>Début du printemps – Reprise de la croissance</b> .....	18
<b>Fin du printemps – Période de pleine croissance</b> .....	22
<b>Une année de cumul de biomasse de repousse</b> .....	25
<b>La qualité du fourrage au cours de l'année</b> .....	26
<b>Impact des ovins et comportement</b> .....	30
<b>Botanique et diversité spécifique</b> .....	30
<b>Rappel des effets marquants</b> .....	33
<b>A surveiller</b> .....	33
<b>Références</b> .....	34
<b>Remerciements</b> .....	34

## Contexte

En France, le nombre de centrales solaires au sol, s'étendant sur plusieurs hectares, a considérablement augmenté ces dernières années. Les objectifs politiques pour la Transition Énergétique appellent à une multiplication par quatre de la production photovoltaïque d'ici à 2028. Cela passe par le déploiement à une échelle importante de centrales implantées sur des grandes surfaces, notamment sur des terrains identifiés comme agricoles.

Actuellement, plusieurs centrales solaires sont mises à disposition d'éleveurs ovins pour une valorisation de l'herbe par pâturage. Des observations de terrain laissent penser que les panneaux ont un effet bénéfique sur la pousse de l'herbe en cas de fortes chaleurs et/ou de sécheresses. Toutefois, les éventuels effets sur l'ensemble des saisons et les effets à plus long terme sont encore peu caractérisés scientifiquement.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des prairies en place sur les centrales solaires, JPee et Photosol, deux producteurs indépendants d'électricité renouvelable, ont noué un partenariat avec INRAE, spécifiquement avec l'Unité Mixte de recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP) de Clermont-Ferrand.

Un premier rapport a été publié en octobre 2020 (Madej, 2020) qui permettait de montrer les bénéfices de l'effet d'ombrage dû aux panneaux sur la pousse de l'herbe durant l'été 2020, et

notamment en période de sécheresse. Ce nouveau rapport vise à reprendre ces résultats et à y intégrer ceux obtenus sur une année complète de juin 2020 à juin 2021.

## Objectifs

Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer les effets de la présence des panneaux solaires sur la pousse de l'herbe (quantité et qualité) et le microclimat dans un système pâturé dédié aux ovins. Cela passe par l'étude des déterminants abiotiques (quantité de lumière, température et humidité du sol) et biotiques (espèces présentes, taux de recouvrement de la végétation) de la pousse de l'herbe. Deux sites ont été suivis, un en plaine (+ 235 m) à Braize dans l'Allier provenant d'une reconversion après l'abandon d'une pépinière (géré par JPee et construit en 2018) et un en moyenne montagne (+ 840 m) à Marmanhac dans le Cantal provenant d'une prairie permanente (géré par Photosol et construit en 2013) (Tableau 1).

## Méthodes

Entre juillet 2020 et juin 2021, des mesures *in situ* ont été réalisées sur des zones d'échantillonnage protégées du pâturage des ovins (en exclos) et installées dans différents traitements : sous panneaux solaires (P), en inter-rangées (I) et en pleine lumière, espacé des panneaux (contrôle : C). Des capteurs ont été installés sur place à raison de trois transects par traitement pour mesurer les variations du microclimat aérien (rayonnement, pluviométrie) et souterrain (température et d'humidité du sol) et connectés à des stations météo, afin d'évaluer les conséquences sur la végétation et le sol (Illustration 1).

En parallèle, un suivi de la végétation a été réalisé autour des transects de sondes tout en simulant la défoliation par les ovins (coupe de la végétation à 5 cm de hauteur sur des quadrats de 0.25 m<sup>2</sup>) avec des mesures hebdomadaires de hauteur d'herbe mesurée à l'aide d'un herbomètre, de l'état de verdissement de la végétation (NDVI) mesuré avec un appareil portable (GreenSeeker, Trimble®) pour déterminer la dynamique de l'état de la végétation. La végétation a été coupée à 5 cm de haut pour mesurer la biomasse produite après un mois de repousse (séchage en étuve à 60°C pendant 48h). La qualité du fourrage a été estimée par des mesures de fibres totales (NDF), d'azote total (N) et carbone total (C), mesurés au laboratoire.

Cependant, les quadrats n'ont pas été coupés entre le 15 octobre et le 5 mars pour éviter « d'épuiser » la végétation face aux climats automnal et hivernal à venir. C'est cohérent avec la sortie des animaux des parcelles. Les valeurs entre ces dates correspondent donc à un écart de temps d'environ un mois pour avoir tout de même un suivi pendant la période automnale et hivernale. De plus, aucun suivi a été réalisé en décembre et janvier, ce qui explique que le mois de janvier n'apparaît pas dans les analyses.

Des mesures similaires (NDVI, biomasse, qualité) ont également été réalisées en dehors des exclos sur plusieurs zones dans les parcs et toujours dans les trois modalités : panneaux, inter-rang et contrôle.

L'ensemble de ces données a ensuite été traité par des analyses statistiques avec le logiciel R (v 4.1.2).

Tableau 1 : Description des sites étudiés

Site	Mise en service	Système	Superficie du parc étudié	Largeur des tables de panneaux (incliné 25°)	Largeur des inter-rangées	Hauteur min des panneaux	Hauteur max des panneaux	Espacement sonde P	Espacement sonde I	Espacement sonde C	Sol
Braize (03)	01/10/2018	Fixe bipieux	14.72 ha	3.5 m	4 m	+ 0.70 m	+ 3 m	0.875 m	1 m	0.92 m	Sable limoneux
Marmanhac (15)	27/01/2014	Fixe monopieux	12.89 ha	2.9 m	1.85 m	+ 0.80 m	+ 2.1 m	0.725 m	0.46 m	0.59 m	Limon argileux sableux

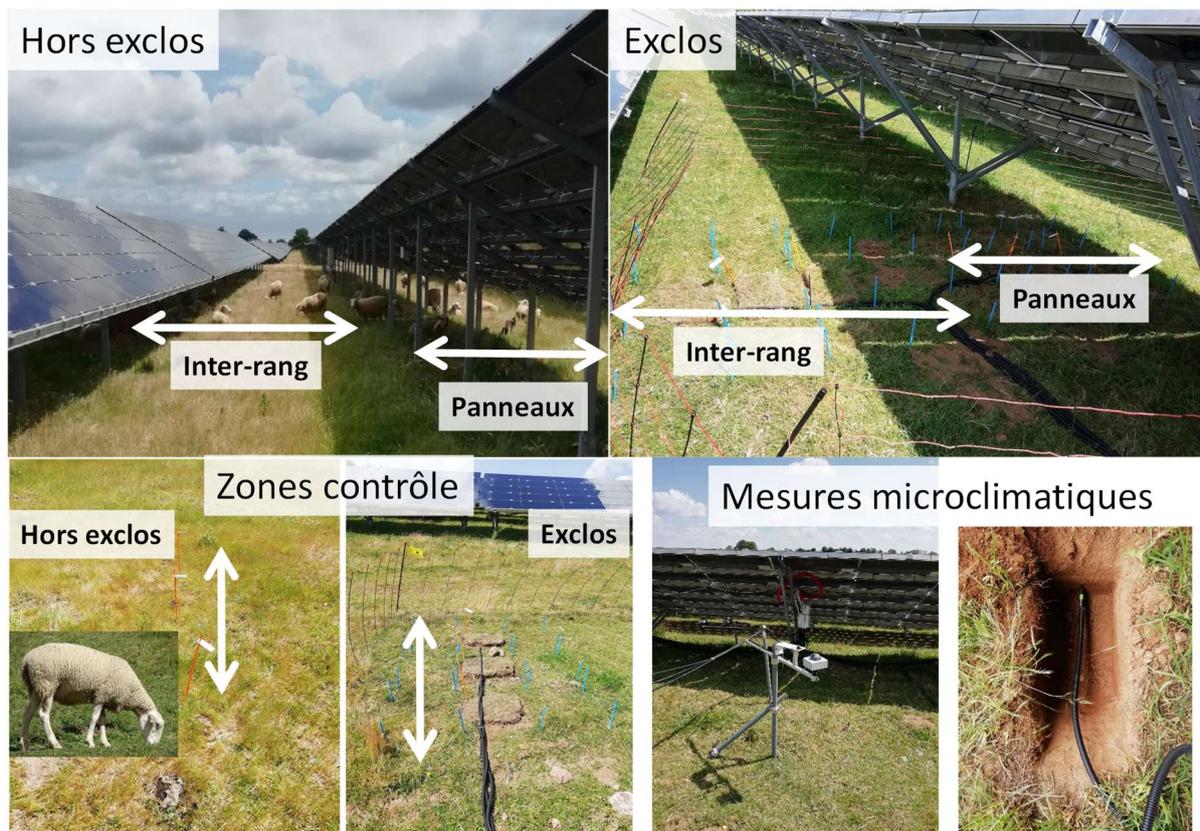
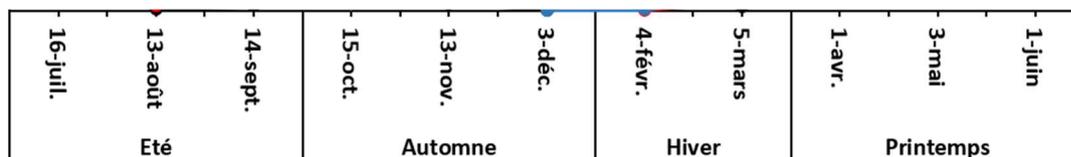


Illustration 1 : Schéma montrant les différentes modalités investiguées pour suivre la pousse de l'herbe et le microclimat aérien et souterrain (en bas à droite, vue de la mini-fosse montrant un capteur d'humidité et de température).

Les périodes suivies sont précisées ci-dessous :



### Conclusions Principales

Le cumul de la quantité de biomasse produite, sans pâturage, après les huit prélèvements, sur les deux sites, mesurée en contrôle, est intermédiaire aux deux autres traitements (Figure 1). Ainsi, la productivité fourragère à l'année ne semble pas pénalisée dans les zones d'influence des panneaux (sous panneaux et inter-rangées) durant l'année 2020/2021. Toutefois, la production de biomasse présente des variations saisonnières.

La qualité du fourrage produit, en exclos, possède une teneur en azote total mais aussi en fibres totales plus élevée sous les panneaux qu'en pleine lumière. La réponse dans le parc peut présenter des différences avec l'exclos, notamment de l'été à la fin de l'hiver, puisque la végétation n'est pas coupée au même endroit chaque mois. Effectivement, la réponse observée en exclos est un potentiel de la végétation essentiellement constitué de tissus verts et jeunes alors que celle du parc provient d'une végétation à un stade phénologique différent et avec une histoire plus ancienne venant des saisons précédentes et du pâturage.

On peut ainsi conclure de cette première année que dans les parcs photovoltaïques, les modifications importantes du microclimat de la végétation induisent une diversité élevée de la quantité et de la qualité du fourrage qu'offrent peu ou pas les prairies sans ombrage.

- **Conclusions sur la quantité de biomasse :**

En faisant le cumul de la quantité de biomasse produite, sur l'année 2020/2021, sans pâturage, après les huit prélèvements, la biomasse sur les deux sites en contrôle sans influence des panneaux solaires est intermédiaire aux deux autres traitements présentant une influence de la présence des panneaux (Figure 1). Cependant, entre le cumul sous les panneaux et le cumul en inter-rangée, la réponse est variable entre les sites. Effectivement, sur Braize, le cumul de biomasse sous les panneaux est 1.5 fois plus important qu'en inter-rangée alors qu'il est 1.3 fois plus faible sur Marmanhac. Néanmoins, en prenant en compte la moyenne des zones avec influence des panneaux solaires et la zone sans influence, le cumul moyen sur les huit prélèvements ne présente plus de différences. L'influence des panneaux sur les deux zones sous panneaux et en inter-rangée se compense donc. Le cumul de biomasse de repousse en contrôle atteint 1.67 t/ha sur Braize et 1.74 t/ha sur Marmanhac et est en moyenne en panneaux et inter-rangée à 1.60 t/ha sur Braize et 1.78 t/ha sur Marmanhac.

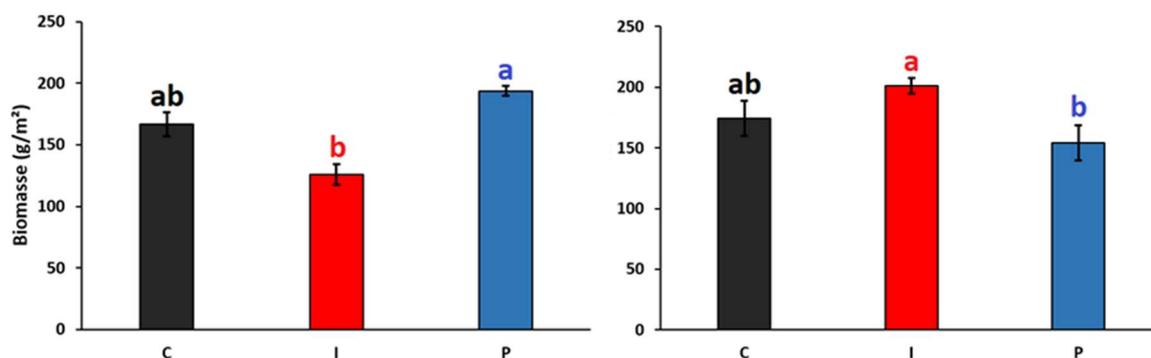


Figure 1 : Cumul de biomasse ( $g\ m^{-2}$ ) mesurée de juillet 2020 à juin 2021, après huit coupes, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) 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 production de biomasse, en exclos sans pâturage (Figure 6), est cependant variable en fonction des saisons entre les différents traitements. La croissance en hauteur de la végétation est favorisée sous les panneaux (Figure 4). Néanmoins, à terme sous les panneaux, la présence plus importante de sol nu et les contraintes liées à l'ombrage, contrebalancent cet avantage en égalisant la quantité annuelle de biomasse produite. En présence de mouton, le stock de fourrage (Figure 8) mesuré en plein soleil et sous les panneaux ne montrent quasiment jamais de différences. Le potentiel de croissance de la végétation à l'ombre des panneaux peut être compensé par les perturbations ovines tel que le piétinement par exemple. Cependant, une forte variabilité du stock de biomasse en plein soleil a aussi pu masquer des différences.

- **Conclusions principales sur le microclimat :**

Il est observé un microclimat différent et une évolution différente au cours de l'année entre les différentes zones.

Concernant la température du sol (Figure 2) : Sur les deux sites, la présence des panneaux présente le même effet sur la température du sol. Il fait plus frais en période estivale sous les panneaux (différences avec la zone de contrôle de 5.3°C sur le site de Braize et de 3.8°C sur le site de Marmanhac) ; puis les températures chutent en automne-hiver avec les températures en inter-rangée qui sont légèrement plus froides. En début de printemps, les températures réaugmentent plus vite en zones ensoleillées en gardant un écart sous les panneaux qui est plus frais.

Concernant l'humidité du sol (Figure 3) : La réponse de l'humidité du sol en fonction de la présence des panneaux solaires est différente entre les deux sites. Sur Braize, le couvert des panneaux ne montre pas d'avantage en lien avec l'humidité du sol en période estivale, au contraire, les panneaux semblent limiter la ré-humectation du sol en période de pluie. A l'opposé, sur Marmanhac, le couvert des panneaux semble limiter la perte en eau lors de sécheresses durant la période estivale. Cependant, la nature du sol et l'infrastructure sont différentes entre les deux sites. Le sol de Braize a une texture sableuse tandis que le site de Marmanhac est plutôt de type limono-sableux. Cela explique que le taux d'humidité est faible sur Braize car l'eau s'infiltrerait rapidement et la réserve en eau est faible. De plus, plus la largeur des panneaux est grande (comme sur Braize), plus la surface ne recevant pas de pluie est importante. La pluie est emmenée du côté le plus bas des panneaux, même si les panneaux présentent des interstices. De ceux-ci, la pluie ruisselle sur l'infrastructure et tombe très localement sous les panneaux. A l'opposé, sur Marmanhac, avec des largeurs de tables de panneaux petites, la proportion de « frontière » entre sous panneaux et inter-rangée pour l'infiltration de l'eau de l'inter-rangée vers sous panneaux est plus importante permettant une meilleure homogénéisation de l'humidité du sol.

- **Conclusion sur la croissance en hauteur de l'herbe :**

Sur les deux sites, en absence des ovins, la croissance potentielle est 2.9 à 6.4 fois plus grande en période estivale sous les panneaux solaires comparée à la zone sans influence des panneaux (contrôle). Les conditions météorologiques estivales, avec un rayonnement intense et une humidité du sol faible, provoquent un arrêt de la croissance conduisant à un dessèchement de la végétation en zones contrôle et inter-rang comparé à la végétation à l'ombre des panneaux (Illustration 2). En zone de plaine, cet effet positif de la croissance se poursuit jusqu'au milieu de l'automne en étant 5.1 fois plus grande, tandis qu'en zone de moyenne montagne, la croissance de l'herbe est fortement ralentie dès la fin de l'été par les températures fraîches.

Après un arrêt de croissance en hiver sur les deux sites, la croissance reprend plus précocement et dès le début du printemps, sous les panneaux, mais de façon 2.8 fois plus rapide sur le site de Braize que sur le site de Marmanhac. Durant le printemps, la croissance de repousse est 2.4 à 2.5 fois plus importante sous les panneaux solaires qu'en zone sans influence des panneaux.

La réponse de la croissance en inter-rangée est différente entre sites. Sur le site de Braize, la végétation présente une dynamique similaire à celle du contrôle et sur le site de Marmanhac, elle tend à être intermédiaire aux deux autres traitements. Ceci pourrait être lié au microclimat lumineux dans cette zone car les deux sites ont des espacements de panneaux entre les rangs très différents : 2.7 m Marmanhac et 4.3 m Braize, ainsi que des hauteurs max de table variable : 2 m Marmanhac et 3 m Braize.

Globalement, la croissance sous les panneaux et en zone contrôle ont des réponses similaires sur les deux sites, bien qu'elles présentent des différences de dynamique en lien avec le climat différent. La croissance sous panneaux s'arrête plus tôt et la reprise est plus lente sur le site de moyenne montagne.

Les différences d'infrastructure des panneaux solaires entre les deux sites ont des conséquences sur le microclimat des plantes, avec un milieu plus lumineux sur Braize, et plus ombré sur Marmanhac. Des différences de composition botanique pourraient aussi expliquer ces résultats.

- **Conclusion sur la présence de sol nu :**

Sur les deux sites, la superficie en sol nu visible avant le prélèvement de biomasse est 2.2 à 3.7 fois plus importante et stable sous les panneaux. Ceci peut être lié à la croissance des plantes en lien avec la compétition pour la lumière mais aussi à l'effet « splash » lors de précipitations. Alors que sur Marmanhac, la quantité de sol nu est majoritairement stable en Contrôle et en Inter-rangée, sur Braize, ces traitements voient une présence de sol nu aussi importante que sous les panneaux durant la période estivale. Cependant, le pourcentage de sol nu diminue à nouveau avec le regain de la végétation et des conditions climatiques favorables à la croissance. Ce phénomène de sol nu contrebalance les bénéfices liés à une croissance améliorée sous les panneaux et impacte la production de biomasse.

**A noter : Cette étude sera poursuivie en 2022 et 2023.**

## Synthèse de l'influence de la présence des panneaux solaires sur la dynamique prairiale en fonction des saisons

### Milieu d'été - Effet de la sécheresse

Période de repousse : Braize : 16 juillet – 13 août ; Marmanhac : 24 juillet – 25 août

#### 1) Microclimat (juillet-août)

Pendant l'été, la température de l'air a atteint +39.2°C le 31/07/2020 sur Braize et +35.4°C le 07/08/2020 sur Marmanhac. Sur les deux sites, le rayonnement solaire a été réduit en moyenne sur cette période d'environ 93-94% sous les panneaux, comparé au traitement contrôle (Braize,  $P = 53.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $C = 758.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; Marmanhac,  $P = 51.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $C = 838 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Dans ces conditions, la température du sol, à l'ombre des panneaux est plus fraîche de 6.6 °C sur Braize ( $P = 20.5 \text{ °C} \pm 0.15$ ;  $C = 27.1 \text{ °C} \pm 0.07$ ) et de 3.8 °C sur Marmanhac ( $P = 17.8 \text{ °C} \pm 0.12$ ;  $C = 21.6 \text{ °C} \pm 0.12$ ) par rapport à la zone sans influence des panneaux. Les températures du sol en inter-rangée ne sont pas aussi chaudes qu'en contrôle en étant à  $24.9 \text{ °C} \pm 0.6$  sur Braize et  $19.3 \text{ °C} \pm 0.4$  sur Marmanhac (Figure 2).

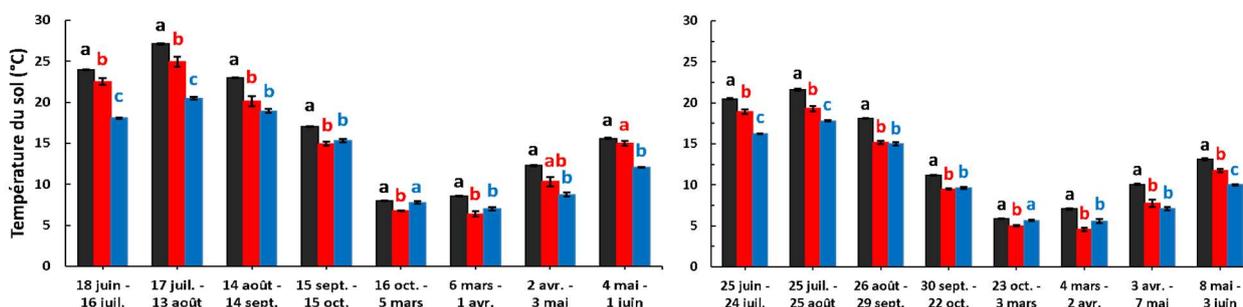


Figure 2 : Moyenne de la température du sol sur une période de repousse de la végétation sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque période, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un point après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Sur le site de Braize, le sol a une faible réserve utile en eau car il est de texture sableuse. Ceci est confirmé par les faibles valeurs d'humidité du sol ( $< 10\%$ ) mesurées dans les trois traitements (Figure 3). Celle-ci ne dépassait pas 7.4 % durant le mois d'août. Quant au site de Marmanhac, le sol a une

réserve utile en eau plus élevée car la texture est limono-sableuse et le sol est de type andosol, c'est-à-dire riche en matière organique. Ceci est confirmé par des valeurs d'humidité du sol supérieures à celles mesurées sur Braize. L'effet sécheresse est observée début août dans la zone contrôle pour atteindre 15.4 % d'humidité du sol en moyenne sur la période. Celle-ci a aussi diminué dans l'inter-rang (23.5 %), et de façon moins importante voire très faiblement sous les panneaux (28.4 % d'humidité).

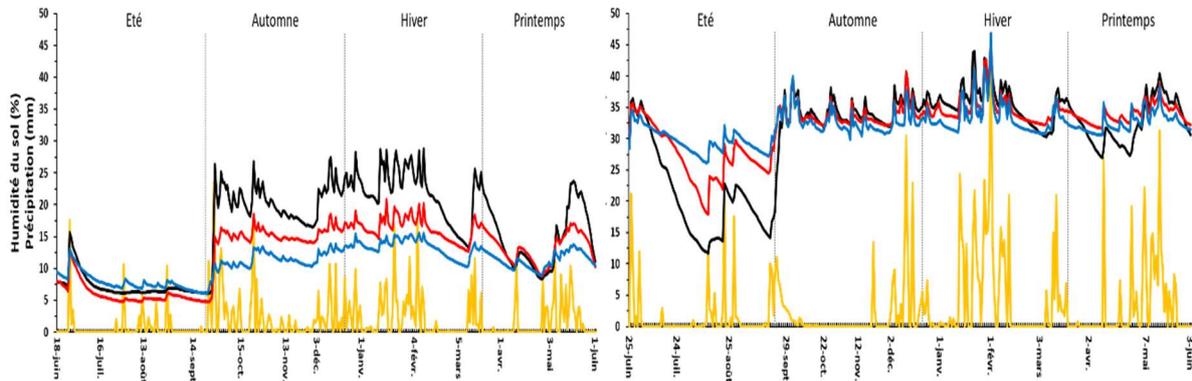


Figure 3 : Dynamique journalière de l'humidité du sol (%) en fonction des traitements et précipitations (mm) pour les sites de Braize (gauche) et de Marmanhac (droite). Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; jaune : Précipitations. Les pointillés délimitent la période sans coupe du 15/10 au 5 mars.

## 2) Réponse de la végétation en zone d'excls (juillet-août)

Pour les deux sites, la diminution de l'humidité du sol en contrôle a engendré un stress hydrique puisque la croissance en hauteur est quasiment arrêtée ( $\sim 0.02 \text{ cm j}^{-1}$ ) sur la période de repousse d'août (Figure 4). Cependant la croissance de la végétation sous les panneaux est 38 fois plus importante sur Braize ( $P = 0.19 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.02$  ;  $C = 0.005 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.002$ ) et 10 fois plus importante sur Marmanhac ( $P = 0.20 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.01$  ;  $C = 0.02 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.005$ ). L'inter-rang a répondu de manière similaire au contrôle sur Braize ( $0.01 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.006$ ) et de manière similaire sous panneaux sur Marmanhac ( $0.13 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.03$ ).

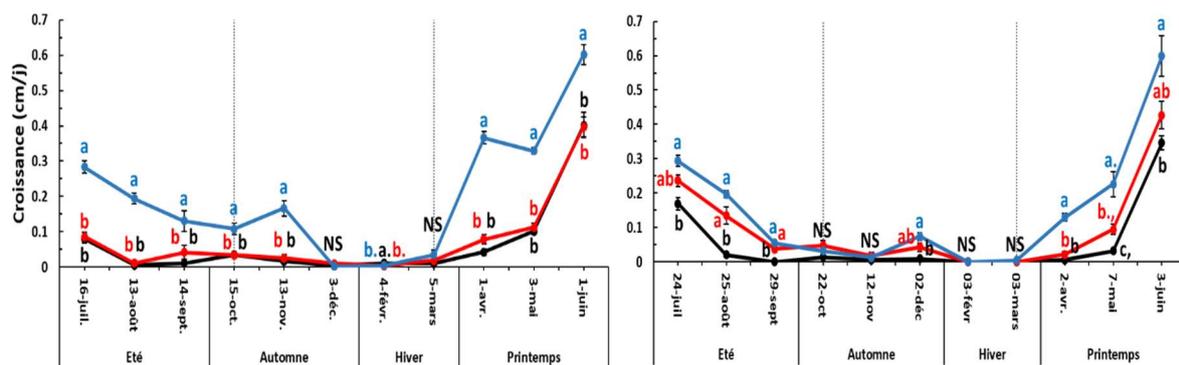


Figure 4 : Dynamique temporelle de la croissance journalière en hauteur ( $\text{cm j}^{-1}$ ) en fonction des traitements, en exclos, pour les sites de Braize (gauche) et de Marmanhac (droite). Pour chaque période, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un point après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

L'indice NDVI, indicateur du verdissement de la végétation, a été 1.6 fois plus grand sur Braize ( $P = 0.45 \pm 0.02$  ;  $I = 0.32 \pm 0.02$  ;  $C = 0.28 \pm 0.02$ ) et 2.1 fois plus grand sur Marmanhac ( $P = 0.63 \pm 0.03$  ;  $I = 0.64 \pm 0.05$  ;  $C = 0.30 \pm 0.01$ ), sous panneau comparé au contrôle (Figure 5). L'inter-rang a répondu de manière similaire au contrôle sur Braize et de manière similaire sous panneaux sur Marmanhac. Une

valeur d'indice NDVI inférieure ou égale à 0.30 signifie que la végétation est sèche voir morte en l'absence de sol nu, ce qui est observé sur la zone contrôle. Ces réponses correspondent aux effets classiques d'une sécheresse, qui après l'arrêt de la croissance, peut conduire à une senescence de la végétation si le stress est long et intense. La présence de sol nu peut affecter les mesures de NDVI. Pour le site de Braize, le pourcentage de sol nu représente en moyenne 40% de la surface dans chaque traitement, alors que pour Marmanhac, celui-ci est 2.5 fois plus important sous les panneaux (P = 10.83 % ± 1.94 ; C = 4.39 % ± 0.41) qu'en contrôle.

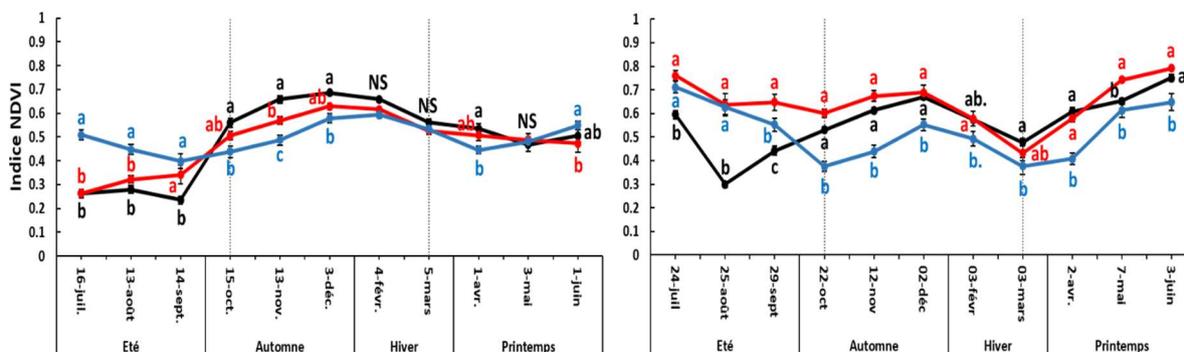


Figure 5 : Dynamique temporelle de l'indice de verdissement (NDVI) par traitement en exclus sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

Les différences de dimensions de l'infrastructure des panneaux (espacement des panneaux et densité) entre les deux sites (rangées moins larges sur Marmanhac et plus denses que sur Braize) pourraient expliquer les différences de réponse de la végétation du traitement Inter-rangée. La végétation dans ce traitement répond de manière similaire au traitement P sur Marmanhac pour lequel les conditions sont plus humides et plus fraîches, ce qui explique le développement de mousse.

La quantité de biomasse mesurée en août sur les deux sites est de 4.7 (Marmanhac) à 5 (Braize) fois plus importante à l'abri des panneaux par rapport à la biomasse produite sans l'influence des panneaux (Braize :  $P = 13.95 \text{ g m}^{-2} \pm 1.16$  ;  $C = 2.81 \text{ g m}^{-2} \pm 0.39$  ; Marmanhac :  $P = 38.95 \text{ g m}^{-2} \pm 11.63$  ;  $C = 8.36 \text{ g m}^{-2} \pm 1.04$  ; Figure 6). En inter-rangée, durant cette période de repousse, la production de biomasse a été la même que le Contrôle sur Braize ( $I = 3.13 \text{ g m}^{-2} \pm 0.77$ ), tandis qu'à Marmanhac, l'inter-rang a eu la même production que sous les panneaux ( $I = 35.81 \text{ g m}^{-2} \pm 5.16$ ).

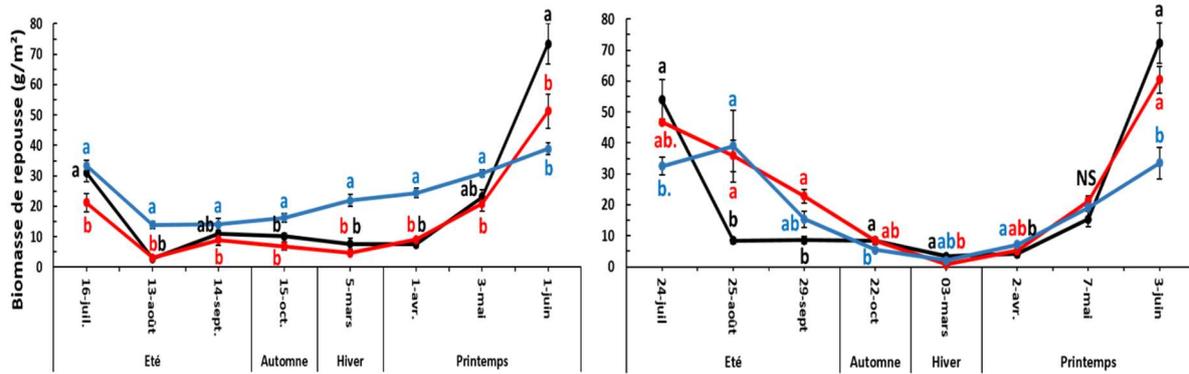


Figure 6 : Dynamique temporelle de la biomasse mesurée après repousse ( $g\ m^{-2}$ ), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (Braize) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (Marmanhac); NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Durant la sécheresse, grâce au microclimat plus frais et plus humide (en fonction de la texture du sol) ainsi qu'avec la protection du rayonnement intense, la croissance, l'état de verdissement et la production de biomasse sont plus importants à l'ombre des panneaux solaires qu'en pleine lumière. Les effets en inter-rangée sont variables selon les sites et les dimensions des panneaux et inter-rangs.

### 3) Dans le parc, avec la présence des ovins (juillet-août)

L'indice NDVI présente la même réponse dans le parc par rapport à l'exclos. La qualité sous les panneaux est 1.74 fois plus élevée, sur Braize ( $P = 0.47 \pm 0.02$ ;  $C = 0.27 \pm 0.01$ ), qu'en zone sans influence des panneaux et 1.39 fois sur Marmanhac ( $P = 0.53 \pm 0.02$ ;  $C = 0.38 \pm 0.03$ ) (Figure 7). En inter-rangée, la réponse sur Braize est similaire au contrôle ( $I = 0.30 \pm 0.01$ ), cependant, sur Marmanhac, l'indice NDVI est 1.2 fois supérieur au contrôle mais 1.2 fois inférieur au traitement panneaux ( $I = 0.45 \pm 0.02$ ).

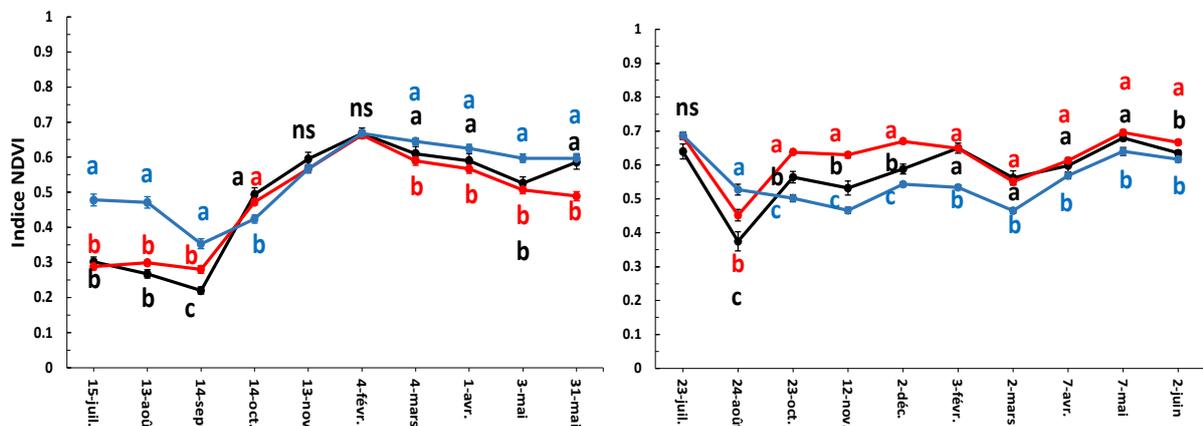


Figure 7 : Dynamique temporelle de l'indice de verdissement (NDVI) par traitement sur le parc, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.



Illustration 2 : Photographique sur le site de Braize (gauche) et le site de Marmanhac (droite) durant la période de sécheresse montrant la différence prononcée de l'état de la végétation entre l'inter-rangée et sous les panneaux.

Les stocks de biomasse mesurés de juillet à septembre sont similaires entre les traitements et stables dans le temps, quel que soit le site, malgré des valeurs moyennes plus élevées dans le contrôle que sous panneaux sur le site de Braize (par ex ; valeurs d'août : C = 85.09 ± 27.42 g m<sup>-2</sup> ; P = 60.80 ± 10.62 g m<sup>-2</sup>) et sur le site de Marmanhac (C = 60.26 ± 17.67 g m<sup>-2</sup> ; P = 64.63 ± 5.49 g m<sup>-2</sup>) (Figure 8).

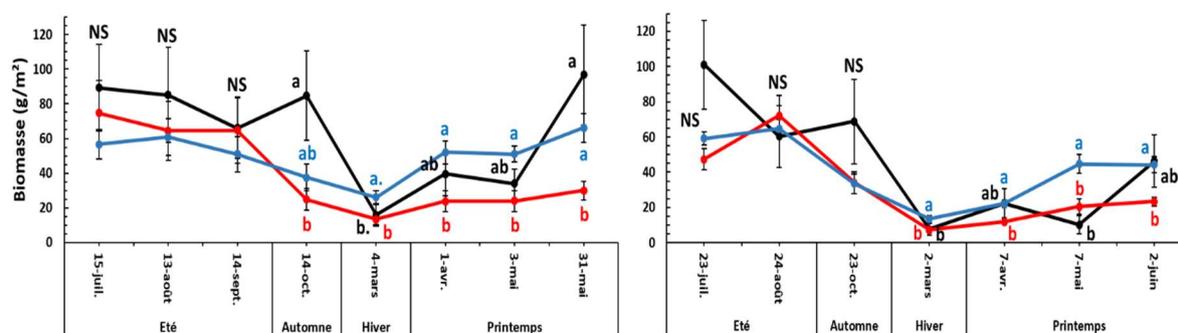


Figure 8 : Dynamique temporelle du stock de biomasse (g m<sup>-2</sup>), mesuré sur le parc, pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives (P < 0.05) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS : P > 0.05 ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne ± erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Cette absence d'effet statistique est liée à l'hétérogénéité élevée observée en contrôle qui s'explique par une variabilité spatiale des conditions de sol (histoire des sites), de végétation et de présence des animaux sur les deux parcs. De plus, la stabilité des valeurs de stocks au cours de l'été pourrait être liée à un effet sécheresse (absence de croissance, faible NDVI) et une pression de pâturage faible et peut-être différente entre les traitements. Ceci pourrait masquer l'effet observé en exclos sous panneaux (Braize et Marmanhac) et inter-rang (Marmanhac), qui a produit plus de biomasse en août.

### De la sécheresse au début d'automne – Regain de la végétation

Période de repousse : Braize : 14 septembre – 15 octobre ; Marmanhac : 29 septembre – 22 octobre

#### 1) Microclimat (septembre-octobre)

En automne, la position du soleil devient moins haute et le rayonnement ne passe plus au-dessus des structures des panneaux solaires créant plus d'ombre en inter-rangée. La quantité de rayonnement a été divisée par 2.3 en contrôle et par 1.8 à l'ombre des panneaux depuis août, avec une réduction de 91.4 % de lumière en moins sous panneau comparé au plein soleil (Marmanhac : C = 329.4 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, P = 28.3 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ; Braize : C = 356.1 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, P = 30.2 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). La température journalière moyenne de l'air a chuté respectivement de 8.6 °C et 12.6 °C entre la période de sécheresse et

l'automne (Br : 13.93 °C ; Ma : 7.97 °C) en ayant des températures de l'air sur la période du début de l'automne arrivant au minimum à 3.6 °C sur Braize et à 0.9°C sur Marmanhac. Ceci a entraîné une chute des températures du sol en perdant 10°C en contrôle et en inter-rangée sur les deux sites et 5.2 °C et 8.2°C sous les panneaux respectivement sur Braize et Marmanhac par rapport à la période d'août. Les températures du sol sur Marmanhac sont descendues vers les 10°C ( $P = 9.61 \text{ °C} \pm 0.13$  ;  $I = 9.48 \text{ °C} \pm 0.06$  ;  $C = 11.14 \text{ °C} \pm 0.04$  ; Figure 9.b), et sont comparativement plus chaudes de 5°C sur Braize ( $P = 15.32 \text{ °C} \pm 0.2$  ;  $I = 14.95 \text{ °C} \pm 0.2$  ;  $C = 17.04 \text{ °C} \pm 0.07$  ; Figure 9.a).

La quantité de précipitations a fortement augmenté sur Braize et a été multipliée par 4.8 (de 24 mm à 115 mm) par rapport à la période d'août, avec un cumul depuis le 13 août de 137 mm. Ceci a augmenté l'humidité du sol de +9.3% en contrôle, +6% en inter-rangée mais seulement de +1.6% sous les panneaux ( $P = 8.94 \% \pm 0.94$  ;  $I = 11.04 \% \pm 0.5$  ;  $C = 15.60 \% \pm 0.84$  ; Figure 9.c). Le traitement Contrôle se retrouve 41% et 75 % plus humides qu'en inter-rangée et sous les panneaux. Sur Marmanhac, alors qu'il y a eu de faibles précipitations durant la période d'octobre (10.8 mm), l'humidité du sol est similaire entre les traitements. Cependant, l'augmentation de l'humidité du sol provient du cumul depuis le 25 août avec 102 mm pour un gain de + 19 % en contrôle, + 10.5 % en inter-rangée et + 5 % sous panneaux ( $P = 33.31 \% \pm 2.19$  ;  $I = 33.92 \% \pm 2.15$  ;  $C = 34.39 \% \pm 1.07$  ; Figure 9.d).

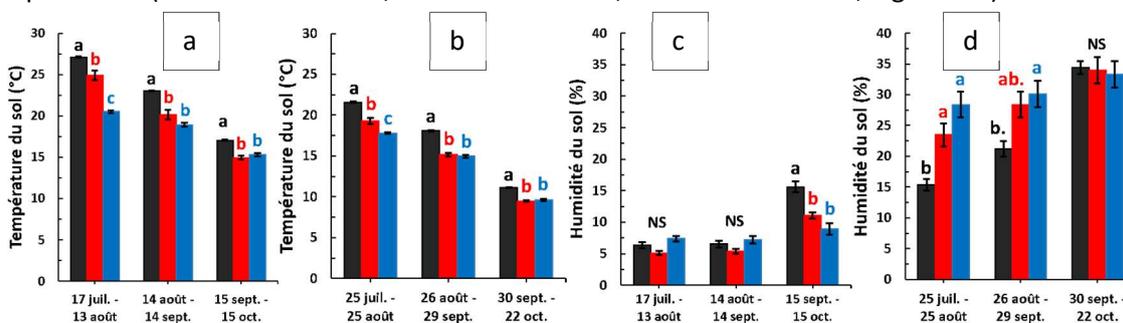


Figure 9 : Moyenne de la température (a ; b) et de l'humidité (c ; d) du sol sur une période de repousse de la végétation sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque période, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA (c) et le test post-hoc de Tukey ou le test de Kruskal-Wallis (a ; b ; d) et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un point après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Ces conditions météorologiques sont plus favorables à la pousse de la végétation dans le traitement contrôle à cause de la réduction de l'évapotranspiration.

Le fait que l'humidité du sol en inter-rangée sur Braize ne réaugmente pas au même taux que celui en contrôle, en comparaison du site de Marmanhac, peut être expliqué par la nature du sol. Le sol de Braize a une texture principalement composée de sable limoneux dans tout le parc. Cependant, en inter-rangée, la perméabilité est plus importante qu'en contrôle, car la pierrosité y est 2.3 fois plus élevée ( $I = 25\%$  ;  $C = 10.8\%$ ). Ceci accentue le côté drainant d'un sol sableux et donc présente une réserve d'eau utile plus faible. Ce type de sol limite la diffusion horizontale de l'eau au profit de la diffusion verticale, notamment vers le sol sous les panneaux. Contrairement à l'andosol du site de Marmanhac où, en plus, la diffusion horizontale est amplifiée par la pente présente.

## 2) Réponse de la végétation en zone d'exclos (septembre-octobre)

Sur Marmanhac, la croissance en hauteur au début de l'automne a été divisée par 6.2 sous les panneaux, par 2.8 en inter-rangée et est restée stable en contrôle par rapport à la période de sécheresse ( $P = 0.03 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.01$  ;  $I = 0.05 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.01$  ;  $C = 0.01 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.00$  ; Figure 10.b). Les trois traitements ne présentent plus de différence de croissance en hauteur en ne dépassant pas  $0.05 \text{ cm j}^{-1}$ .

<sup>1</sup>. Sur le site de Braize, la croissance sous panneaux, divisée par 1.8, est restée 3.2 fois plus élevée comparée à celles mesurées dans le contrôle et à l'inter-rang bien que ces dernières aient très légèrement augmenté ( $P = 0.11 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.02$  ;  $I = 0.03 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.01$  ;  $C = 0.04 \text{ cm j}^{-1} \pm 0.006$  ; Figure 10.a). Ces différences entre les deux sites pourraient venir de conditions thermiques plus élevées (environ +6°C) en plaine qu'en moyenne montagne.

Pour les deux sites et dans la zone contrôle, le verdissement de la végétation a fortement augmenté, au début de l'automne, avec un indice NDVI 1.8 à 2 fois plus grand que celui mesuré lors de la sécheresse (Br :  $0.56 \pm 0.02$ ; Ma :  $0.53 \pm 0.01$ ), alors qu'il est resté stable sous les panneaux sur Braize ( $0.44 \pm 0.03$  ; Figure 10.c) et a été divisé par 1.7 sur Marmanhac ( $0.38 \pm 0.02$  ; Figure 10.d). En inter-rangée, l'indice NDVI est resté stable sur Marmanhac ( $0.60 \pm 0.02$ ) et a augmenté d'1.6 fois sur Braize ( $0.51 \pm 0.02$ ). Le NDVI sous les panneaux s'est retrouvé 28 % à 41 % plus faible qu'en contrôle sur Marmanhac et Braize. Quant à l'inter-rangée, l'indice est intermédiaire aux autres traitements sur Braize et 60 % plus important que sous panneaux sur Marmanhac. Pendant toute la période automnale, la même réponse est visible tout en ayant des indices grandissants. Cette hiérarchie peut s'expliquer par un pourcentage de sol nu stable et plus élevé sous les panneaux des deux sites ainsi qu'un recouvrement du sol nu 1.8 à 2.5 fois moins important respectivement en inter-rangée et en contrôle sur Braize par rapport à août ( $C = 15 \% \pm 2$  ;  $I = 21.5 \% \pm 3$ ). De plus, la quantité de végétation sèche a aussi été divisée depuis août sur Marmanhac et Braize de 3.4 à 5.5 fois respectivement en contrôle et de 3.5 fois en inter-rangée sur Marmanhac qui ce dernier présente un pourcentage de mousse plus important. A l'inverse, la végétation sèche sous les panneaux sur Marmanhac est 2.7 fois plus importante.

Cette importance du sol nu sous les panneaux peut être expliquée par l'effet splash induit par le ruissellement sur la structure lors de précipitations endommageant la végétation. De plus, le recouvrement végétal est aussi lié à la biologie de l'espèce par rapport à son cycle de vie et à son port végétatif. La phytosociologie en lien avec la compétition pour la lumière à l'ombre des panneaux peut aussi expliquer la présence de sol nu.

Au cours des périodes de repousse suivant la période de sécheresse estivale et jusqu'au début de l'automne, la production de biomasse présente une réponse différente entre les deux sites. Sur le site de Braize, la production de biomasse sous panneaux est restée stable alors qu'elle a été divisée par 7.1 sur Marmanhac. Elle a augmenté en contrôle de 3.6 et en inter-rangée de 2.2 au début de l'automne par rapport à la période d'août ( $P = 16.26 \text{ g m}^{-2} \pm 1.42$  ;  $C = 10.19 \text{ g m}^{-2} \pm 0.84$  ;  $I = 6.84 \text{ g m}^{-2} \pm 1.31$  ; Figure 10.e) sur Braize. La production de biomasse reste cependant 1.6 fois plus importante sous les panneaux par rapport à la zone sans influence des panneaux à cette période. Sur Marmanhac, la production de biomasse a été divisée par 4.3 en inter-rangée et est restée stable en contrôle ( $P = 5.48 \text{ g m}^{-2} \pm 0.68$  ;  $C = 8.46 \text{ g m}^{-2} \pm 0.63$  ;  $I = 8.41 \text{ g m}^{-2} \pm 1.15$  ; Figure 9.f). Les différents traitements ne présentent plus de différences significatives.

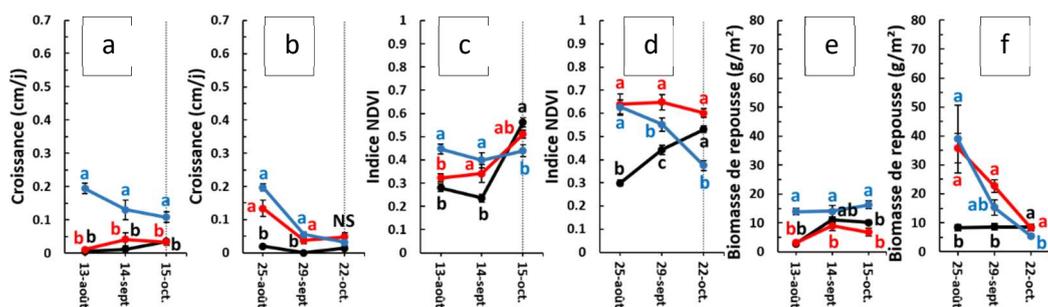


Figure 10 : Dynamique temporelle de la croissance journalière (a ; b), l'indice de verdissement (NDVI ; c ; d) et de la biomasse de repousse (e ; f) par traitement en exclos sur le site de Braize (a ; c ; e) et sur le site de Marmanhac (b ; d ; f). Pour chaque

date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (c ; d ; e) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (a ; b ; f) ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

A la sortie de conditions météorologiques très sèches et chaudes, l'indice de verdissement augmente dans les zones non couvertes par les panneaux. La différence de réponse entre les deux sites avec une reprise de la production de biomasse sur Braize et une chute de la production de biomasse sur Marmanhac est avant tout due au climat et à la localisation des sites en plaine ou en moyenne montagne. Les différences de réponse de l'inter-rangée entre les deux sites sont sûrement liées en partie à la différence des infrastructures mais aussi aux différences de texture du sol.

### 3) Dans le parc, avec la présence des ovins (septembre-octobre)

Pour les deux sites, l'indice de verdissement de la végétation présente une réponse similaire dans le parc avec l'effet du pâturage et dans la zone d'exclus sans pâturage. Sous les panneaux, il est plus faible de 17% sur Braize ( $P = 0.42 \pm 0.01$  ;  $C = 0.50 \pm 0.02$  ;  $I = 0.47 \pm 0.01$  ; Figure 11.a) et de 12% sur Marmanhac ( $P = 0.50 \pm 0.01$  ;  $C = 0.56 \pm 0.02$  ;  $I = 0.64 \pm 0.01$  ; Figure 11.b) qu'en contrôle et de respectivement 11% et 27 % qu'en inter-rangée car l'indice a augmenté nettement dans ces deux traitements d'août à octobre notamment sur Braize.

En octobre, sur le site de Braize, la quantité de biomasse est plus élevée dans le contrôle comparé aux à l'inter-rang ( $C = 84.7 \pm 25.9 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 24.8 \pm 6.4$  ;  $P = 37.4 \pm 7.7 \text{ g m}^{-2}$  ; Figure 11.c). La fauche réalisée dans l'inter-rang par l'agriculteur dans une zone très productive du parc sur les points suivis a amplifié la diminution du stock de biomasse disponible dans ce traitement. Cet effet sur le contrôle est observable au prochain prélèvement de mars car l'agriculteur n'a pas fauché les zones suivies en octobre. Sur le site de Marmanhac, le stock de biomasse est similaire entre traitements ( $C = 68.8 \pm 24.02 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 34 \pm 6.1$  ;  $P = 33.47 \pm 5.53 \text{ g m}^{-2}$  ; Figure 11.d). L'absence de différence statistique provient de l'hétérogénéité au sein de la zone sans influence des panneaux qui est très importante en étant 3.3 à 4.3 fois plus grande que sous les panneaux.

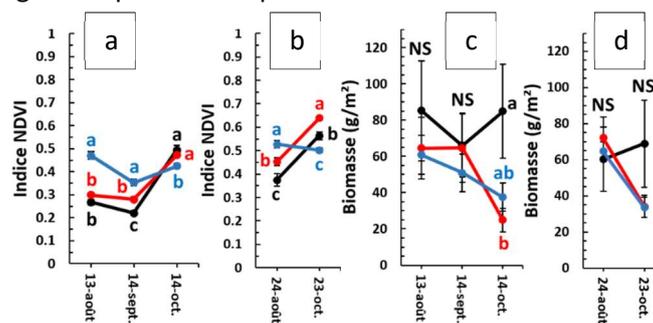


Figure 11 : Dynamique temporelle de l'indice de verdissement (NDVI ; a ; b) et du stock de biomasse (c ; d) par traitement sur le parc, sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

Sur les deux mois septembre et octobre, la production sous les panneaux sur le site de Braize en absence de pâturage est stable dans le temps avec une moyenne cumulée sur les deux mois de + 30 g m<sup>-2</sup> sur Braize. Cependant, cette production n'est pas visible dans le parc qui présente un stock de biomasse diminuant de - 23 g m<sup>-2</sup>. L'écart entre la production de biomasse en exclus et la diminution du stock dans le parc qui est de 54 g m<sup>-2</sup> sur Braize serait liée à la consommation de fourrage par les

ovins. La consommation ne peut être visible ni en inter-rangée à cause de la fauche de l'agriculteur ni en contrôle à cause de la forte hétérogénéité du traitement.

Sur Marmanhac, le même raisonnement est applicable sous les panneaux et en inter-rangée avec une production de biomasse en exclos respectivement de + 21 g m<sup>-2</sup> et + 31 g m<sup>-2</sup> alors que la perte dans le parc est de - 31 g m<sup>-2</sup> et de - 38 g m<sup>-2</sup> ce qui fait un écart de 52 g m<sup>-2</sup> et de 69 g m<sup>-2</sup> qui correspondrait à la consommation par les moutons sur les mois de septembre et octobre cumulés. Le stock en contrôle dans le parc présente une hétérogénéité trop importante pour voir des variations liées au pâturage.

## Fin de l'hiver – Arrêt de la croissance

Période de repousse : Braize : 15 octobre – 5 mars ; Marmanhac : 22 octobre – 3 mars

### 1) Microclimat (octobre-mars)

Les conditions météorologiques deviennent plus froides avec une durée d'ensoleillement plus faible et 1.3 à 1.5 fois moins intense par rapport au début de l'automne en dehors de l'abri des panneaux (Braize : C = 235.5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ; Marmanhac : C = 259.6 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Depuis la dernière coupe au début de l'automne, la température moyenne journalière de l'air (7.1 et 5°C) a diminué de 6.9°C pour Braize et de 3°C pour Marmanhac, avec des périodes de gel. Effectivement, il y a eu 15 jours (Braize) et 26 jours (Marmanhac) pour lesquels la moyenne journalière était en dessous de 0°C jusqu'à atteindre un minimum de -8.5 °C (Braize) et -11°C (Marmanhac).

Ceci a impacté la température du sol en se retrouvant sous la barre des 8°C en moyenne pour Braize (P = 7.78 ± 0.13 ; I = 6.78 ± 0.05 °C ; C = 8.54 ± 0.06 °C ; Figure 12.a) et de 6°C en moyenne pour Marmanhac (P = 5.65 ± 0.06 ; I = 5 ± 0.08 °C ; C = 5.87 ± 0.04 °C ; Figure 12.b). Sur les deux parcs, l'inter-rangée a présenté une température moyenne plus basse que les autres traitements car contrairement au contrôle, l'inter-rangée est à l'ombre et contrairement à la situation sous panneaux, l'inter-rangée n'a pas de couverture thermique liée à la présence des panneaux. La température minimale du sol sur Braize a été de 1.7°C en contrôle, 1.1°C en inter-rangée et 1.8°C sous les panneaux, atteinte le 11/01/21, et de 1°C sous les panneaux le 15/01/21 et 1.2°C en contrôle ainsi que 1°C en inter-rangée le 28/01/21 sur Marmanhac. La différence de date entre les deux sites pourrait être due à la présence de neige, qui a servi de tapis d'isolation pour le sol en inter-rangée et en contrôle lors de températures très froides. Quant à la zone sous les panneaux, elle n'a pas été recouverte par la neige. Cette neige a eu des impacts visibles sur la végétation, notamment, en cachant la végétation du soleil, en écrasant la végétation, surtout en inter-rangée, car la neige tombant sur les panneaux glissait en inter-rangée. Cet effet est visible au début de février où la hauteur de la végétation est divisée par 2.5 fois en inter-rangée par rapport au contrôle (I = 1.56 ± 0.11 cm ; C = 3.89 ± 0.12 cm).



Illustration 3 : Photographie sur le site de Marmanhac montrant la protection des panneaux face aux chutes de neige.

Sur cette période de 4 mois, la moitié des précipitations de l'année est tombée sur les deux sites avec 299 mm sur Braize et 500 mm sur Marmanhac. Ceci a permis au sol de Braize de regagner + 5.86 % en humidité en contrôle, + 5 % en inter-rangée et + 3.8 % sous les panneaux (P = 12.74 ± 0.73 % ; I = 16 ±

1 % ; C = 21.46 ± 0.81 % ; Figure 12.c). L'humidité sous panneaux est néanmoins toujours 70% plus faible qu'en contrôle comparé à la période où le stock en eau du sol est au maximum. Sur Marmanhac, l'humidité du sol n'a pas varié en restant à son maximum et est restée similaire entre les traitements (P = 33.11 ± 2.12 % ; I = 34.49 ± 2.11 % ; C = 35.46 ± 0.98 % ; Figure 12.d).

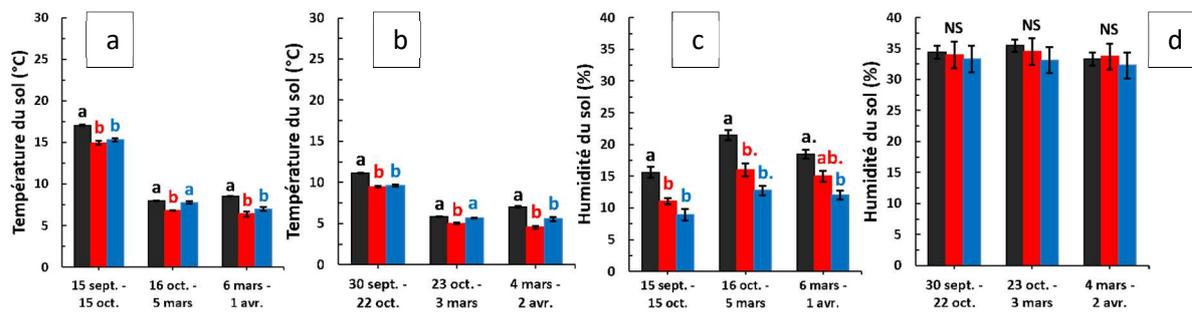


Figure 12 : Moyenne de la température (a ; b) et de l'humidité (c ; d) du sol sur une période de repousse de la végétation sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque période, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA (c) et le test post-hoc de Tukey ou le test de Kruskal-Wallis (a ; b ; d) et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un point après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne ± erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

## 2) Réponse de la végétation en zone d'exclos (octobre-mars)

La croissance en hauteur de la végétation sur le site de Marmanhac était déjà très ralentie voir à l'arrêt ( $P = 0.01 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $I = 0.02 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $C = 0.01 \pm 0.00 \text{ cm j}^{-1}$  ; Figure 13.b). Uniquement sur le site de Braize, la végétation sous les panneaux a continué de croître, pendant un mois jusqu'en novembre, en ayant une croissance 10 fois plus importante par rapport à la zone sans influence des panneaux ( $P = 0.17 \pm 0.02 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $I = 0.03 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $C = 0.02 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ; Figure 13.a).

Sur les deux sites, même en l'absence de croissance en hauteur observable, l'indice NDVI a augmenté dans tous les traitements durant la fin de la saison automnale jusqu'en décembre (Braize :  $P = +32 \%$  ;  $I = +23 \%$  ;  $C = +22 \%$  ; Marmanhac :  $P = +47 \%$  ;  $I = +15 \%$  ;  $C = +26 \%$ ). Cette augmentation reflète la récupération suite à la sécheresse estivale et à la densification de la végétation. Cependant, en hiver, sur Braize, l'indice NDVI a diminué ( $P = -8 \%$  ;  $I = -20 \%$  ;  $C = -22 \%$  ; Figure 13.c) pour ne plus montrer de différence entre les traitements ( $P = 0.53 \pm 0.02$  ;  $I = 0.53 \pm 0.02$  ;  $C = 0.56 \pm 0.02$ ). La quantité de sol nu est pourtant plus faible ( $P (-16 \%) = 34.61 \pm 4.26 \%$  ;  $I (-46 \%) = 14.72 \pm 1.68 \%$  ;  $C (-79 \%) = 8.40 \pm 1.08 \%$ ). Sur Marmanhac, le même constat est remarqué, alors que les croissances sont à l'arrêt, l'indice NDVI diminue durant l'hiver par rapport à la fin de l'automne ( $P = -47 \%$  ;  $I = -59 \%$  ;  $C = -40 \%$  ; Figure 13.d). Le contrôle reste 1.3 fois plus élevé que sous les panneaux à la fin de l'hiver ( $P = 0.38 \pm 0.04$  ;  $I = 0.43 \pm 0.03$  ;  $C = 0.48 \pm 0.02$ ). Cependant, l'indice NDVI en inter-rangée est légèrement supérieur à celui sous les panneaux, alors qu'il y a une même quantité de sol nu ( $I = 15.94 \pm 4.30$ ). Cela pourrait venir du fait que la quantité de végétation sèche soit 2.3 fois plus importante sous les panneaux ( $I = 13.94 \%$ ). De plus, la quantité de mousse visible en inter-rangée est 2 fois plus grande en atteignant  $52.5 \pm 7.69 \%$  du quadrat en mousses visibles ( $P = 26.33 \pm 7.03 \%$ ). L'augmentation du sol nu visible d'un coefficient de 2.9 en inter-rangée par rapport au début de l'automne a été causée par l'activité des campagnols terrestres (*Arvicola amphibius* L.) creusant des galeries et créant des monticules de terre dans les zones de suivi.

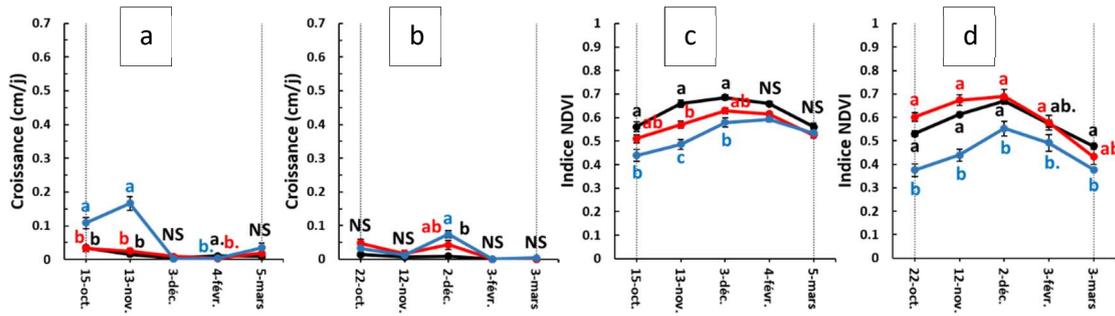


Figure 13 : Dynamique temporelle de la croissance journalière (a ; b) et l'indice de verdissement (NDVI ; c ; d) par traitement en exclos sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (c ; d) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (a ; b) ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

Sur les deux sites, à la sortie de l'hiver, la quantité de biomasse dans les traitements inter-rangées et en contrôle est similaire et très faible. Cependant, sous les panneaux, celle-ci est variable entre les deux sites. Elle est aussi très faible et en même quantité que pour C et I sur le site de Marmanhac ( $P = 2.01 \pm 0.53 \text{ g.m}^{-2}$  ;  $I = 0.77 \pm 0.34 \text{ g.m}^{-2}$  ;  $C = 3.36 \pm 0.55 \text{ g.m}^{-2}$  ; Figure 14). Alors que sur Braize, la biomasse à l'ombre des panneaux est 4.7 fois plus importante par rapport à l'inter-rangée et 2.9 fois plus importante qu'en contrôle ( $P = 21.96 \pm 1.85 \text{ g.m}^{-2}$  ;  $I = 4.69 \pm 0.94 \text{ g.m}^{-2}$  ;  $C = 7.69 \pm 1.93 \text{ g.m}^{-2}$  ; Figure 14). La quantité de biomasses en fin d'hiver provient de la croissance de la végétation au milieu de l'automne avant l'arrêt hivernal.

Pendant l'hiver, quelles que soient l'altitude ou l'infrastructure, la croissance est à l'arrêt et les conditions climatiques en période de grand froid diminuent la qualité de la prairie.

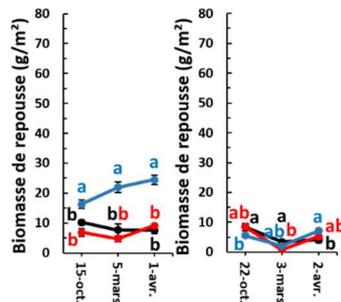


Figure 14 : Dynamique temporelle de la biomasse de repousse par traitement en exclos sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (gauche) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (droite) ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

### 3) Dans le parc, en absence d'ovins (octobre-mars)

L'indice de verdissement de la végétation présente la même réponse que dans l'exclos. Après une augmentation du NDVI durant l'automne, l'indice mesuré sous les panneaux ne diffère pas du contrôle, sur Braize ( $P : 0.65 \pm 0.01$  ;  $C : 0.61 \pm 0.02$  ; Figure 15.a), mais il est 1.2 fois plus faible sur Marmanhac ( $P : 0.47 \pm 0.01$  ;  $C : 0.56 \pm 0.02$  ; Figure 15.b). Ceci peut être expliqué par la quantité plus importante de végétation sèche et de sol nu présentes sous les panneaux. Le NDVI en inter-rangée est similaire au contrôle sur les deux sites (Br :  $0.59 \pm 0.01$  ; Ma :  $0.55 \pm 0.01$ ).

Depuis octobre, sur les deux sites, le stock de biomasse mesuré en mars a diminué en contrôle, sur Braize, avec une baisse de 81 % ( $-68.85 \text{ g m}^{-2}$ ) et baisse de 89 % sur Marmanhac ( $-61.22 \text{ g m}^{-2}$ ). Sous

panneaux et en inter-rangée, sur Braize, ils sont restés statistiquement stables alors qu'ils sont 79% plus faibles en inter-rangée ( $- 26.85 \text{ g m}^{-2}$ ) et 60 % plus faible sous panneaux sur Marmanhac ( $- 20.02 \text{ g m}^{-2}$ ). Le stock de biomasse sous les panneaux est donc 1.64 fois plus grand qu'en contrôle sur Braize ( $P : 25.95 \pm 3.82 \text{ g m}^{-2}$ ;  $C : 15.87 \pm 6.28 \text{ g m}^{-2}$ ;  $I : 13.40 \pm 3.24 \text{ g m}^{-2}$ ; Figure 15.c) et 1.77 fois sur Marmanhac ( $P : 13.45 \pm 1.84 \text{ g m}^{-2}$ ;  $C : 7.62 \pm 3.38 \text{ g m}^{-2}$ ;  $I : 7.17 \pm 1.84 \text{ g m}^{-2}$ ; Figure 15.d). L'inter-rangée est similaire au contrôle sur les deux sites. La chute uniquement en contrôle du stock de biomasse sur Braize vient des répercussions de la fauche de l'agriculteur et du fait que les moutons sont sortis du parc deux semaines après le prélèvement d'octobre. Sur Marmanhac, la chute importante en inter-rangée et en contrôle est lié aux chutes de neiges tassant la végétation. Sous panneaux, ceci pourrait provenir de la consommation par les moutons présents encore un mois après le prélèvement d'octobre.

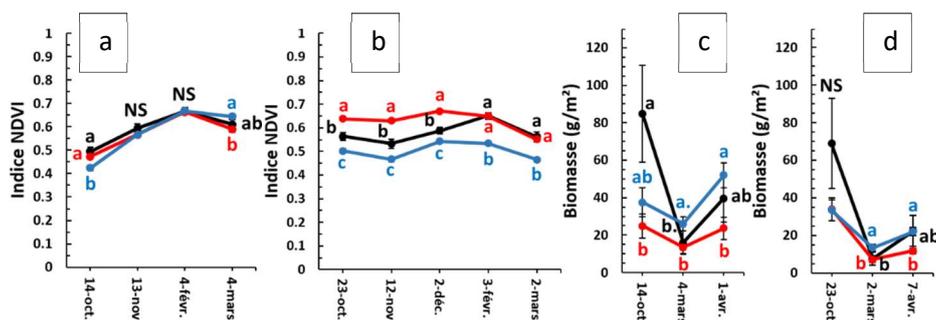


Figure 15 : Dynamique temporelle de l'indice de verdissement (NDVI ; a ; b) et du stock de biomasse (c ; d) par traitement sur le parc, sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

A la sortie de l'hiver, du fait de l'arrêt de la croissance ainsi que des événements climatiques et agricoles, les stocks de biomasse des parcs sont faibles.

## Début du printemps – Reprise de la croissance

Période de repousse : Braize : 5 mars – 1 avril ; Marmanhac : 3 mars – 7 avril

### 1) Microclimat (mars-avril)

Depuis la période précédente, le microclimat a beaucoup changé mais pas pour toutes les variables et les deux sites. Dans le cas du rayonnement mesuré en pleine lumière, il a été multiplié par 2.2 à 2.4 pour les deux sites, tandis que sous les panneaux cette augmentation a été moindre ( $\times 1.6$ ) (Braize :  $C = 516 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $P = 33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; Marmanhac :  $C = 621 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $P = 41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Cependant, le rayonnement mesuré sous les panneaux reste 93.5% plus faible qu'en plein soleil sur les deux sites.

Depuis la précédente période, la température de l'air est semblable pour Braize (environ  $7^\circ\text{C}$ ) et a augmenté de  $1.3^\circ\text{C}$  sur Marmanhac pour atteindre  $6.3^\circ\text{C}$ . Pour ce dernier site, cela se traduit par l'augmentation de  $3.2^\circ\text{C}$  des températures maximales observées et qui est moindre sur Braize ( $+1.6^\circ\text{C}$ ). Des températures minimales inférieures à 0 sont toujours observées pour cette période et sur les deux sites. De plus, du fait de l'isolation thermique des panneaux notamment la nuit par rapport au contrôle, le cumul de degrés jours observés sous les panneaux pourrait être plus avancé et conduire à une reprise plus précoce de la végétation en sortie d'hiver.

Nous avons aussi observé lors des sorties terrain l'absence de rosée sous les panneaux comparés à I et C, notamment lors de températures de l'air froides pouvant encore atteindre au minimum  $-4.2^{\circ}\text{C}$ . Cela met en évidence que sous panneaux, soit le taux d'humectation de la végétation est plus faible soit la température de l'air est plus élevée, soit les deux phénomènes coexistent. Ces conditions microclimatiques pourraient favoriser une reprise plus précoce de croissance de la végétation en sortie d'hiver.

La température du sol a peu varié par rapport à la période précédente dans les traitements inter-rangée et panneaux et a augmenté en contrôle de  $0.6$  à  $1.2^{\circ}\text{C}$  respectivement sur Braize ( $P = 7 \pm 0.22^{\circ}\text{C}$  ;  $I = 6.39 \pm 0.33^{\circ}\text{C}$  ;  $C = 8.54 \pm 0.02^{\circ}\text{C}$  ; Figure 12.a) et Marmanhac ( $P = 5.55 \pm 0.25^{\circ}\text{C}$  ;  $I = 4.55 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$  ;  $C = 7.05 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$  ; Figure 12.b) en étant légèrement plus chaude de  $2.3$  à  $2.5^{\circ}\text{C}$  qu'en inter-rangée et d' $1.5^{\circ}\text{C}$  sous les panneaux. Ce dernier traitement a diminué de  $0.8^{\circ}\text{C}$  à Braize.

L'humidité du sol a peu varié depuis la période précédente, notamment sur Marmanhac malgré un cumul de précipitations de  $68$  mm et a légèrement diminué sur Braize. Pour Marmanhac, les valeurs sont proches de  $33\%$  ( $P = 32.3 \pm 2.1\%$  ;  $I = 33.7 \pm 2.1\%$  ;  $C = 33.3 \pm 1.1\%$  d'humidité ; Figure 12.d) et ne diffèrent pas entre traitements. Elles sont plus faibles sur Braize de l'ordre de  $15\%$  en moyenne et diffèrent entre le contrôle et le traitement panneaux qui a des valeurs plus faibles ( $P = 12 \pm 0.7\%$  ;  $I = 15 \pm 0.8\%$  ;  $C = 18.5 \pm 0.7\%$  ; Figure 12.c).

## 2) Réponse de la végétation (mars-avril)

Avec le retour d'un climat plus doux, où le rayonnement moyen journalier est équivalent à la période de septembre à octobre sur Braize et d'août à septembre sur Marmanhac, la croissance redémarre sur le site de Braize et uniquement sous les panneaux à Marmanhac ( $P = 0.13 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ; Figure 16.b). Sur Braize, la croissance est  $4.7$  à  $8.7$  fois plus importante sous les panneaux par rapport à l'inter-rangée et au contrôle respectivement ( $P = 0.37 \pm 0.02 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $I = 0.08 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $C = 0.04 \pm 0.01 \text{ cm j}^{-1}$  ; Figure 16.a).



Illustration 4 : Photographies du site de Braize (gauche) et de Marmanhac (droite), début avril, montrant la différence de hauteurs de la végétation sous les panneaux par rapport à l'inter-rangée.

La présence des panneaux favorise une reprise plus précoce de la croissance de la végétation en sortie d'hiver, qui peut s'expliquer par un microclimat plus favorable sous panneaux (absence de rosée gelée, couverture thermique : modification des degrés jours). Des mesures du microclimat autre que le rayonnement sous les panneaux (température et humidité de l'air) devraient confirmer cette hypothèse. Cependant, la biologie des espèces joue un rôle important dans cette reprise de la croissance en fonction de son cycle de vie et des seuils météorologiques pour sa croissance (seuil « zéro de la végétation »).



Illustration 5 : Photographies du site de Braize (gauche) et de Marmanhac (droite), montrant l'absence de gelées sous les panneaux.

L'indice de verdissement (NDVI) est resté stable en contrôle et inter-rangée sur Braize, cependant, il est 20 % plus faible sous les panneaux par rapport à la fin de l'hiver et au contrôle ( $P = 0.45 \pm 0.02$  ;  $I = 0.51 \pm 0.02$  ;  $C = 0.54 \pm 0.02$  ; Figure 16.c). Sur Marmanhac, l'indice a augmenté de 27 % et 34 % respectivement en contrôle et en inter-rangée en lien avec une diminution du sol nu et de la végétation sèche mais il est resté stable sous les panneaux en étant 49 % et 42 % plus faible que les autres traitements ( $P = 0.41 \pm 0.02$  ;  $I = 0.58 \pm 0.02$  ;  $C = 0.61 \pm 0.02$  ; Figure 16.d).

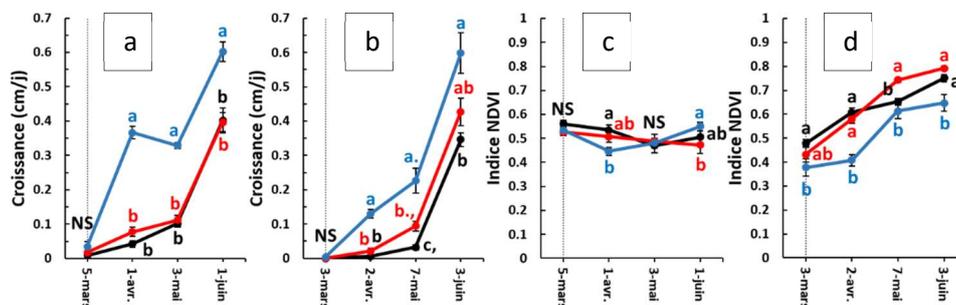


Figure 16 : Dynamique temporelle de la croissance journalière (a ; b) et l'indice de verdissement (NDVI ; c ; d) par traitement en exclos sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (c ; d) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (a ; b) ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

En avril et sur le site de Braize, la biomasse accumulée depuis le 15/10 est environ 3 fois plus élevée sous les panneaux que dans les 2 autres traitements ( $P = 24.4 \pm 1.6 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 9 \pm 0.8 \text{ g m}^{-2}$  ;  $C = 7.5 \pm 1.3 \text{ g m}^{-2}$  ; Figure 14). Sur le site de Marmanhac, l'effet est moindre mais significatif ( $P = 7.1 \pm 0.7 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 5.2 \pm 0.5 \text{ g m}^{-2}$  ;  $C = 4.1 \pm 1 \text{ g m}^{-2}$  ; Figure 14). Cette différence de réponse entre site s'explique par la capacité de la végétation sous panneaux à pousser d'octobre à novembre sur Braize, tandis que les conditions climatiques de moyenne montagne plus froides ne l'ont pas permises.

Sur Braize, la production de biomasse plus importante sous les panneaux peut s'expliquer par l'amélioration du microclimat, avec l'augmentation du rayonnement qui est 2.2 fois plus importante par rapport à la période hivernale en zone contrôle et 1.5 fois plus importante sous les panneaux ( $C = 515.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ;  $P = 33.01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), ainsi que de la disponibilité en eau.

L'absence de différence objective de biomasse pour une croissance nettement différente sur Marmanhac peut être expliquée, outre la différence attendue de surface massique (espèce dépendante), par une baisse probable de densité de la végétation car le % de sol nu est 5.7 fois plus important sous panneaux ( $P = 14.17 \pm 2.36 \%$  ;  $C = 2.5 \pm 0.55 \%$ ).

Avec le redoux printanier, la végétation à l'abri des panneaux commence à croître de façon plus précoce que la végétation sans protection thermique.

### 3) Dans le parc, avec le retour des ovins (mars-avril)

L'indice de verdissement de la prairie sur Braize est stable de mars à avril ( $P = 0.63 \pm 0.01$  ;  $I = 0.57 \pm 0.01$  ;  $C = 0.59 \pm 0.02$  ; Figure 17) avec des valeurs d'indice sous panneaux toujours 10 % plus grandes que l'inter-rangée. Sur Marmanhac, uniquement le contrôle reste stable, alors que l'indice en inter-rangée est 11 % plus grand et 22 % plus grand sous les panneaux ( $P = 0.57 \pm 0.01$  ;  $I = 0.61 \pm 0.01$  ;  $C = 0.60 \pm 0.02$  ; Figure 17). L'écart se rétrécit entre l'inter-rangée et sous les panneaux en restant 8 % plus grand. Le traitement contrôle est intermédiaire sur les deux parcs. La différence de la réponse entre l'inter-rangée et sous les panneaux entre les deux sites pourraient venir de l'écart en végétation sèche qui est 2.3 fois plus important sous les panneaux en exclos sur Marmanhac alors qu'il n'y a pas de différence sur Braize.

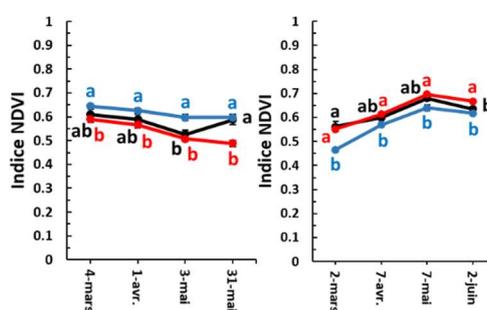


Figure 17 : Dynamique temporelle de l'indice de verdissement (NDVI) par traitement sur le parc, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

En absence de moutons, en avril, sur les deux sites, le stock de biomasse reste stable en contrôle et inter-rangée. Alors que le stock sous les panneaux sur Marmanhac reste stable, il double sur Braize. Le stock sous les panneaux est 2.2 fois supérieur à celui mesuré dans l'inter-rangée sur Braize ( $P = 51.98 \pm 6.56 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 23.69 \pm 5.95 \text{ g m}^{-2}$ ) et de 1.88 fois sur Marmanhac ( $P = 22.05 \pm 2.04 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I = 11.74 \pm 1.54 \text{ g m}^{-2}$ ). Le contrôle ne diffère pas des autres traitements du fait de son hétérogénéité sur les deux sites (Br :  $39.58 \pm 12.55 \text{ g m}^{-2}$  ; Ma :  $22.34 \pm 8.30 \text{ g m}^{-2}$ ).

Les résultats en inter-rangée (Br :  $I_{\text{exclos}} : + 9 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I_{\text{parc}} : + 10.3 \text{ g m}^{-2}$  ; Ma :  $I_{\text{exclos}} : + 5.2 \text{ g m}^{-2}$  ;  $I_{\text{parc}} : + 4.6 \text{ g m}^{-2}$ ) et sous les panneaux (Br :  $P_{\text{exclos}} : + 24.4 \text{ g m}^{-2}$  ;  $P_{\text{parc}} : + 26 \text{ g m}^{-2}$  ; Ma :  $P_{\text{exclos}} : + 7.1 \text{ g m}^{-2}$  ;  $P_{\text{parc}} : + 8.6 \text{ g m}^{-2}$ ) sont cohérents avec la production de biomasse en exclos. Les réponses de la végétation dans les zones en exclos semblent similaires à celles de la végétation dans le parc. Cependant, pour le contrôle, le fait que le stock de biomasse n'augmente pas de manière significative depuis mars est essentiellement lié à l'hétérogénéité au sein du parc. Effectivement, les erreurs standards augmentent de 2 à 2.5 fois par rapport à mars, ce qui signifie que dans certaines zones suivies, le stock de biomasse a augmenté. De plus, en regardant les moyennes du stock du parc, celles-ci sont plus grandes de + 24  $\text{g m}^{-2}$  sur Braize et + 15  $\text{g m}^{-2}$  sur Marmanhac depuis mars, ce qui est respectivement 3.1 et 3.6 fois plus important que la biomasse de repousse en exclos (Br : + 7.5  $\text{g m}^{-2}$  ; Ma : + 4.1  $\text{g m}^{-2}$ ). Les zones suivies en exclos, se situent dans la moyenne basse du parc, dans une zone contrôle peu productive en biomasse.

La réponse de la végétation des différents traitements en absence de pâturage dans le parc semble être la même que la végétation en exclos. Cependant, avec l'hétérogénéité en contrôle, la réponse en exclos semble sous-estimée.

## Fin du printemps – Période de pleine croissance

Période de repousse : Braize : 3 mai – 31 mai ; Marmanhac : 7 mai – 2 juin

### 1) Microclimat (mai-juin)

Comme pour les autres périodes, l'ombrage induit par la présence des panneaux est toujours très marqué, de l'ordre de 92% pour les deux sites (Braize :  $P = 46.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ;  $C = 612 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ; Marmanhac :  $P = 48.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ;  $C = 597.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Sur la période, les conditions microclimatiques se sont nettement améliorées, avec plus de précipitations : 80 mm sur Braize, et 141 mm sur Marmanhac et des températures plus chaudes. La température de l'air (moyenne journalière) a atteint  $12.95^\circ\text{C}$  ( $+5.9^\circ\text{C}$ ) sur Braize et  $10.93^\circ\text{C}$  ( $+4.7^\circ\text{C}$ ) sur Marmanhac. Cela se traduit par une augmentation des température maximales et minimales depuis le début du printemps.

Dans le sol, la température et l'humidité du sol ont augmenté dans les trois traitements et les deux sites. Des effets entre les traitements sont observés sur ces deux variables. La température du sol est plus fraîche de  $3.5^\circ\text{C}$  sur Braize ( $P = 12.1 \pm 0.07^\circ\text{C}$  ;  $C = 15.6 \pm 0.06^\circ\text{C}$  ; Figure 18.a) et de  $3.1^\circ\text{C}$  sur Marmanhac ( $P = 9.99 \pm 0.05^\circ\text{C}$  ;  $C = 13.1 \pm 0.1^\circ\text{C}$  ; Figure 18.b) par rapport à la zone sans influence des panneaux. De plus, l'humidité du sol sous les panneaux est plus faible qu'en contrôle ( $P = 12.3 \pm 1.1\%$  ;  $C = 17.5 \pm 1\%$  ; Figure 18.c) mais uniquement sur Braize (valeurs similaires sur Marmanhac :  $P = 33.4 \pm 2.14\%$  ;  $C = 35.8 \pm 1\%$  ; Figure 18.d).

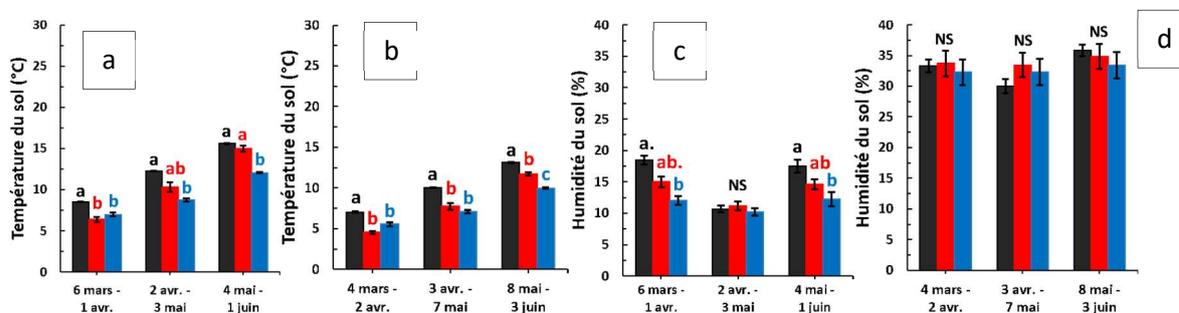


Figure 18 : Moyenne de la température (gauche) et de l'humidité (droite) du sol sur une période de repousse de la végétation sur le site de Braize (a ; c) et sur le site de Marmanhac (b ; d). Pour chaque période, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA (c) et le test post-hoc de Tukey ou le test de Kruskal-Wallis (a ; b ; d) et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un point après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

### 2) Réponse de la végétation (mai-juin)

Sur la période et pour les deux sites, la croissance en hauteur (moyenne journalière) continue d'augmenter (de 1.6 fois sous les panneaux et 9.6 fois en contrôle par rapport au début de la saison pour Br et 1.7 fois sous les panneaux et 57.7 fois en contrôle pour Ma). Celle-ci est toujours nettement plus importante sous les panneaux, quel que soit le site : 1.5 fois par rapport au contrôle sur Braize ( $P = 0.60 \pm 0.03 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $I = 0.40 \pm 0.03 \text{ cm j}^{-1}$  ;  $C = 0.40 \pm 0.04 \text{ cm j}^{-1}$  ; Figure 16.a) et 1.7 fois sur Marmanhac

( $P = 0.60 \pm 0.06 \text{ cm j}^{-1}$ ;  $I = 0.43 \pm 0.04 \text{ cm j}^{-1}$ ;  $C = 0.35 \pm 0.02 \text{ cm j}^{-1}$ ; Figure 16.b). La croissance en inter-rangée est similaire au contrôle sur Braize et intermédiaire sur Marmanhac.

Lors de cette période de pleine croissance, l'indice de verdissement sur Braize est resté stable en inter-rangée et contrôle, cependant, il est sous les panneaux 23% plus grand depuis le début du printemps et 16% plus grand qu'en inter-rangée ( $P = 0.55 \pm 0.02$ ;  $I = 0.47 \pm 0.04$ ;  $C = 0.51 \pm 0.02$ ; Figure 16.c). L'indice en contrôle est intermédiaire. Sur Marmanhac, l'indice a augmenté dans les trois traitements en étant 24% plus grand en contrôle, 15% en inter-rangée et 48% sous les panneaux par rapport au début de la saison. Le traitement contrôle et inter-rangée reste néanmoins respectivement 16 % et 22 % plus élevé qu'à l'ombre des panneaux ( $P = 0.65 \pm 0.04$ ;  $I = 0.79 \pm 0.01$ ;  $C = 0.75 \pm 0.02$ ; Figure 16.d). Cette augmentation viendrait de la croissance supérieure à la sénescence des feuilles. En effet, le pourcentage de végétation sèche visible sur Braize a très légèrement diminué sous les panneaux (12.11% (-3%)). Ceci est le cas aussi sur Marmanhac où la végétation sèche est 1.7 fois moins présente sous les panneaux et 3.9 fois plus faible en inter-rangée par rapport au début de la saison ( $P = 19.28$  %;  $I = 3.61$  %;  $C = 5.67$  %).

C'est sur le site de Marmanhac, à la fin du printemps, durant la pleine croissance, que l'indice NDVI atteint les valeurs les plus hautes en étant à 0.75 en contrôle et à 0.79 en inter-rangée. Pour comparaison, l'indice NDVI, sur Braize, à la même période, est à 0.5 en contrôle et 0.47 en inter-rangée. Outre l'effet non négligeable du pourcentage de sol nu, sur Braize, 10 fois supérieur en inter-rangée et 3.5 fois supérieur en contrôle par rapport au site de Marmanhac, ces différences entre sites pourraient refléter les différences de fertilité des sols des deux sites, si on exclut l'effet diversité végétale. Effectivement, la teneur en azote total du sol est en moyenne 11 fois supérieure sur Marmanhac avec 0.6% de matière sèche contre 0.05 % de matière sèche sur Braize. L'azote étant un constituant majeur de la chlorophylle, ce taux plus élevé en azote du sol sur Marmanhac permet de contribuer à des feuilles et limbes plus verts. Ceci est aussi visible par la teneur en azote total de la végétation qui est pour cette période, sur Marmanhac, 1.53 fois plus élevé en contrôle, par rapport au site de Braize. Ce coefficient est de 1.86 fois en inter-rangée et 1.34 fois sous les panneaux (voir la partie qualité du fourrage).

Lors de la dernière coupe à la fin du printemps (fin mai et début juin), sur les deux sites, la quantité de biomasse sous les panneaux est augmentée de 1.6 fois (Braize) à 4.7 fois (Marmanhac) par rapport au début du printemps. Cependant, la biomasse est 38% (Braize) à 50% (Marmanhac) plus faible sous les panneaux comparés aux traitements contrôle (Braize :  $P = 38.92 \pm 2.05 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $I = 51.31 \pm 5.59 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $C = 73.39 \pm 6.67 \text{ g.m}^{-2}$ ; Figure 19) et aussi l'inter-rang pour Marmanhac ( $P = 33.46 \pm 5.18 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $I = 60.40 \pm 4.26 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $C = 72.25 \pm 6.59 \text{ g.m}^{-2}$ ; Figure 19). La production de biomasse mesurée sous les panneaux n'est donc pas corrélée à la croissance en hauteur journalière. Cet écart de réponse entre hauteur et biomasse pourrait s'expliquer par une baisse de la densité de végétation sous les panneaux, dont le sol nu est un proxy. En effet, il reste 2.2 fois plus important sous les panneaux qu'en contrôle sur Braize ( $P = 40.67 \pm 4.08$  %;  $C = 18.11 \pm 1.65$  %) et Marmanhac ( $P = 11.44 \pm 1.25$  %;  $C = 5.22 \pm 2.45$  %).

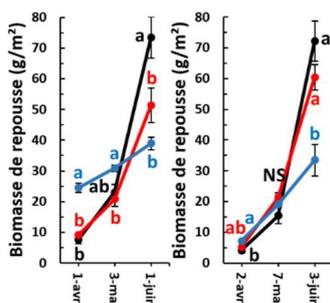


Figure 19 : Dynamique temporelle de la biomasse de repousse par traitement en exclos sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après une ANOVA et un test post-hoc de Tukey (gauche) ou le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn (droite) ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.



Illustration 6 : Photographies prises sur le site de Braize, début mai, montrant la différence de densité de la végétation sur les quadrats coupés à 5 cm sous panneaux (gauche) et en contrôle (droite)

La végétation, bien qu'elle ait une croissance en hauteur plus importante à l'ombre des panneaux grands, ne présente pas une biomasse plus élevée. Le traitement contrôle possède une végétation plus petite mais doit comporter une plus grande densité de végétation, des tissus à des stades phénologiques plus variés (tiges florales, ratio feuilles/tiges plus faible) et ce qui permet, à terme, d'avoir une production de biomasse plus importante.

Ces effets sont aussi dépendants de la biologie des espèces présentes et de la plasticité phénotypique et physiologique liée aux contraintes du microclimat.

### 3) Dans le parc, en présence d'ovins (mai-juin)

Dans le parc, en présence de moutons, l'indice de verdissement de la végétation sous les panneaux ( $0.60 \pm 0.01$  ; Figure 17) dans le parc de Braize est stable dans le temps depuis le début du printemps et présente la même réponse que l'exclos en ne différant pas du contrôle ( $0.59 \pm 0.02$ ). Cependant, sur Marmanhac, alors que le NDVI en exclos était plus faible sous les panneaux, il ne diffère pas non plus ( $P : 0.62 \pm 0.01$  ; Figure 17) dans le parc par rapport au contrôle ( $0.64 \pm 0.01$ ). La différence avec l'exclos provient de la quantité de sol nu visible du fait des coupes sur le même transect. L'inter-rangée présente la même réponse qu'en exclos, sur Braize ( $I = 0.49 \pm 0.01$ ), le NDVI est 18% plus faible que sous les panneaux alors que sur Marmanhac ( $I = 0.67 \pm 0.01$ ), le NDVI est 8% plus grand.

Durant cette période de pleine croissance, uniquement le stock de biomasse sous les panneaux sur Marmanhac est statistiquement 100% plus élevé qu'au début du printemps. Cependant, en regardant depuis la fin de l'hiver, tous les traitements présentent une augmentation significative de leur stock en biomasse, on peut donc considérer qu'ils ont augmenté depuis le début du printemps car ils ne sont pas différents statistiquement entre le prélèvement de mars et avril. Tous les traitements sur

Marmanhac ont doublé leur stock de biomasse depuis le début du printemps ( $P = 44.18 \pm 4.49 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $I = 23.23 \pm 2.59 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $C = 46.38 \pm 14.79 \text{ g.m}^{-2}$ ; Figure 20) alors que sur Braize, le contrôle est 144 % plus important, 26% plus important en inter-rangée et 27 % plus important sous les panneaux ( $P = 66.09 \pm 8.17 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $I = 29.84 \pm 5.3 \text{ g.m}^{-2}$ ;  $C = 96.76 \pm 28.93 \text{ g.m}^{-2}$ ; Figure 20). A la fin du printemps, le stock de biomasse sous les panneaux est 121% et 90% plus important qu'en inter-rangée respectivement sur Braize et Marmanhac. Le traitement contrôle est similaire au traitement panneaux sur Braize et Marmanhac.

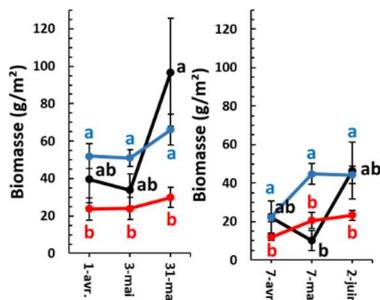


Figure 20 : Dynamique temporelle du stock de biomasse (droite) par traitement sur le parc, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$  ; un symbole après une lettre indique une p-value marginale. Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle ; les pointillés délimitent la période sans coupe.

La production de biomasse dans l'exclos montre une production égale à plus importante à la fin du printemps en inter-rangée comparé à celles sous les panneaux. Cependant, le stock de biomasse présente une réponse inversée, le stock de biomasse est plus important sous les panneaux qu'en inter-rangée. Etant donné que les zones suivies en exclos sont représentatives du parc en lien avec la réponse du stock en absence d'ovins, cette différence de réponse entre les deux conditions serait dû à la consommation ovine. Sur le dernier mois de repousse de mai à juin, les ovins auraient consommé sous les panneaux,  $24 \text{ g m}^{-2}$  et  $34 \text{ g m}^{-2}$ , respectivement sur Braize et Marmanhac, et en inter-rangée  $45 \text{ g m}^{-2}$  et  $58 \text{ g m}^{-2}$ .

Depuis avril, en cumulé, l'exclos a produit  $+70 \text{ g m}^{-2}$  sous les panneaux et  $+72 \text{ g m}^{-2}$  en inter-rangée sur Braize. L'écart du stock de biomasse entre avril et juin dans le parc est de  $+14 \text{ g m}^{-2}$  sous les panneaux et  $+6 \text{ g m}^{-2}$  en inter-rangée. La consommation sur Braize serait de  $56 \text{ g m}^{-2}$  sous les panneaux et  $66 \text{ g m}^{-2}$  en inter-rangée. Sur Marmanhac, pour une production de biomasse, en exclos de  $+53 \text{ g m}^{-2}$  sous panneaux et  $+82 \text{ g m}^{-2}$  en inter-rangée et un écart du stock du parc de  $+22 \text{ g m}^{-2}$  et  $+11 \text{ g m}^{-2}$  respectivement, la consommation serait de  $30 \text{ g m}^{-2}$  sous les panneaux et  $70 \text{ g m}^{-2}$  en inter-rangée sur 2 mois cumulés.

Durant cette période, la consommation des ovins semble plus importante en inter-rangée plutôt que sous les panneaux.

### Une année de cumul de biomasse de repousse

En faisant le cumul de la quantité de biomasse produite après les huit prélèvements, sur les deux sites, la biomasse mesurée en contrôle, est intermédiaire aux deux autres traitements. Cependant, la réponse des deux autres traitements est variable entre les sites. Effectivement, sur Braize, la biomasse sous les panneaux ( $1.94 \pm 0.04 \text{ t ha}^{-1}$ ; Figure 21) est 1.54 fois plus importante qu'en inter-rangée ( $1.26 \pm 0.08 \text{ t ha}^{-1}$ ) alors qu'elle est 23% plus faible sur Marmanhac ( $P = 1.54 \pm 0.14 \text{ t ha}^{-1}$ ;  $I = 2.01 \pm 0.06 \text{ t ha}^{-1}$ ).

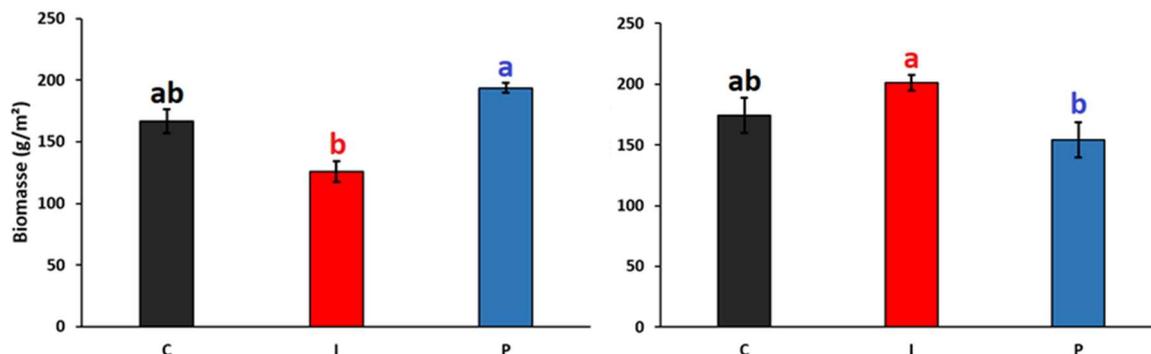


Figure 21 : Cumul de biomasse ( $\text{g m}^{-2}$ ) mesurée de juillet 2020 à juin 2021, après huit coupes, en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) 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.

Bien que la croissance en hauteur puisse être favorisée sous les panneaux, la présence de sol nu et les contraintes liées aux conditions d'ombrage diminue la densité de végétation et modifie les stades phénologiques (absence de tiges florales, ratio feuilles/tiges élevé), ce qui contrebalance cet avantage sur la production de biomasse mesurée sans influence du pâturage. Cependant, ce résultat ne prend en compte qu'un cumul de la biomasse sur des quadrats. Pour calculer une équivalence des terres (LER), il faut prendre en compte l'empreinte des panneaux solaires au sol avec notamment les surfaces des structures (mât, socle de support...). De la même façon, les zones sans influences des panneaux solaires au sein d'un parc agrivoltaïque comportent aussi des chemins d'accès, des postes de transformations et potentiellement des zones de stockages. Il serait pertinent de connaître les niveaux de production de prairies similaires, en termes de gestion et de pédo-climat.

### La qualité du fourrage au cours de l'année

La quantité de biomasse produite après chaque repousse peut varier en fonction des saisons et entre traitements sur les deux sites. Cependant, la biomasse totale produite sur une année montre peu d'effet lié à l'influence des panneaux solaires ce qui n'est pas le cas pour la qualité de la végétation. Effectivement, l'ombre provoquée par la présence des panneaux influence nettement les teneurs en azote total, en carbone total et en fibres totales présentes dans le fourrage.

En zone d'exclos, en moyenne sur l'année et pour les deux sites, la teneur en azote total de la végétation est 1.4 à 1.5 fois plus élevée sous les panneaux ( $P_{\text{Braize}} = 2.55 \pm 0.07$  % de MS ;  $P_{\text{Marmanhac}} = 3.31 \pm 0.07$  % de MS) qu'en contrôle ( $C_{\text{Braize}} = 1.86 \pm 0.09$  % de MS ;  $C_{\text{Marmanhac}} = 2.17 \pm 0.07$  % de MS) (Figure 22). La réponse de la teneur en azote en inter-rangée est variable entre les sites. Elle est similaire à celle du contrôle sur Braize ( $I = 1.82 \pm 0.1$  % de MS) et intermédiaire sur Marmanhac ( $I = 2.83 \pm 0.09$  % de MS). Ceci est cohérent avec les conclusions obtenues sur les autres variables de la végétation et renforce l'hypothèse d'un effet structure des panneaux sur la végétation.

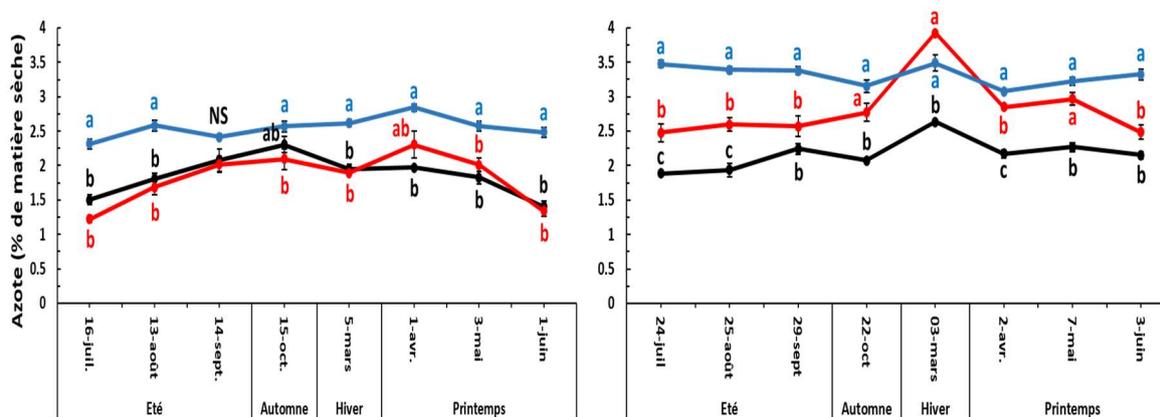


Figure 22 : Dynamique temporelle de la teneur en azote (%) mesurée en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et pour le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Sur les deux parcs (hors exclos), la teneur en N est inférieure d'environ 20% par rapport à celle mesurée en exclos, ce qui est lié à l'état de la végétation car la gestion a été différente entre les deux zones (pâturage aléatoire vs coupes régulières de la végétation). Cet état dépend de l'âge des tissus prélevés (plus âgé sur le parc), une baisse du rapport feuilles/tiges (les tiges contiennent moins d'azote que les feuilles) et enfin des différences entre espèces présentes dans les tris traitements.

Sur le site de Braize, l'effet observé sous les panneaux, comparé au contrôle, est plus marqué que dans la zone d'exclos, x 1.7 en moyenne et multiplié par 2 une grande partie de l'année, de juillet à mars, Figure 23). C'est lié aux faibles valeurs de N mesurées dans les traitements C et I (moyenne de 1.32%). Pour Marmanhac, la réponse est assez proche entre le parc (x 1.4) et l'exclos (x 1.5), avec des effets de l'ordre de x 1.8-1.9 en été et automne. Comme pour l'exclos, l'inter-rang présente une réponse plus ou moins similaire au contrôle (Braize) ou au traitement panneau (Marmanhac).

Ceci signifie que la végétation située sous les panneaux présente une proportion de protéines brutes (protéines vraies et azote d'origine non protéique) plus importantes que la végétation en pleine lumière.

Quelle que soit la zone étudiée et les traitements, la végétation du site de Marmanhac présente des teneurs en N 35% plus élevées que celles mesurées sur le site de Braize. Ceci est cohérent avec les mesures de teneur en azote total du sol, qui sont en moyenne 11 fois supérieures sur Marmanhac (0.6%) que sur Braize (0.05 %), réalisées en janvier.

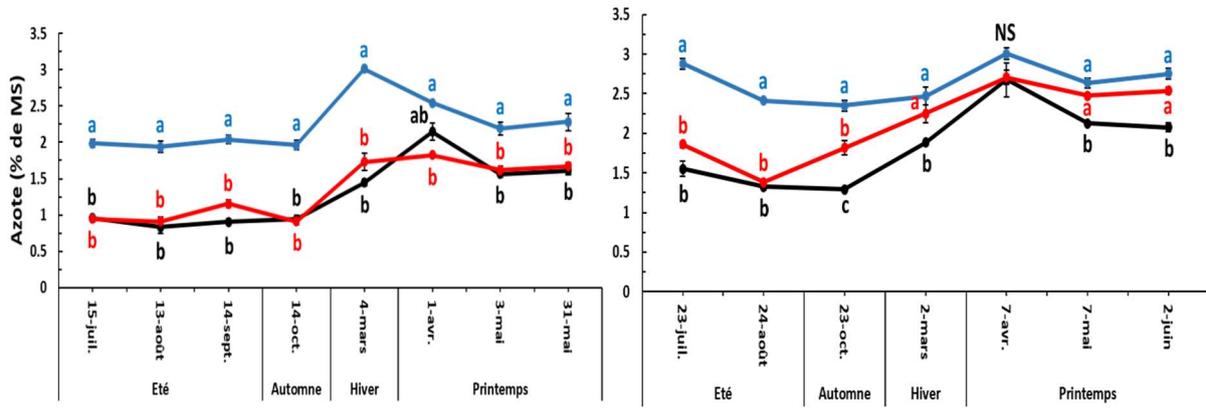


Figure 23 : Dynamique temporelle de la teneur en azote (%), mesurée dans le parc, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et un test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Moyenne  $\pm$  erreur standard. Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

Il est attendu que l'indice NDVI, qui est une mesure indirecte des chlorophylles présentes dans les feuilles et réalisée au niveau du couvert (partie supérieure de la surface mesurée), soit corrélé à la teneur en azote des tissus végétaux. Ce qui n'est pas le cas dans notre étude, sauf lors des périodes de sécheresse. Plusieurs explications peuvent être avancées (1) la présence de sol nu et de mousse ayant des effets opposés sur les valeurs du NDVI ; (2) la précision de la mesure NDVI sur une partie de la végétation comparée à la mesure sur l'échantillon complet avec une méthode de chimie analytique.

En zone d'exclos et pour les deux sites, la végétation du traitement panneau présente des teneurs en C total quasiment toujours inférieures au traitement contrôle, en moyenne de 5 à 7% (Braize :  $P = 41.2 \pm 0.61$  % de MS ; C =  $44.2 \pm 0.27$  % de MS ; Marmanhac :  $P = 42.5 \pm 0.35$  % de MS ; C =  $44.9 \pm 0.18$  % de MS), à l'exception de la fin du printemps (fin mai-début juin) (Figure 24). La teneur en C mesurée en inter-rangé ressemble majoritairement à celle mesurée en contrôle ( $I_{\text{Braize}} = 43.5 \pm 0.42$  % de MS ;  $I_{\text{Marmanhac}} = 44.2 \pm 0.17$  % de MS).

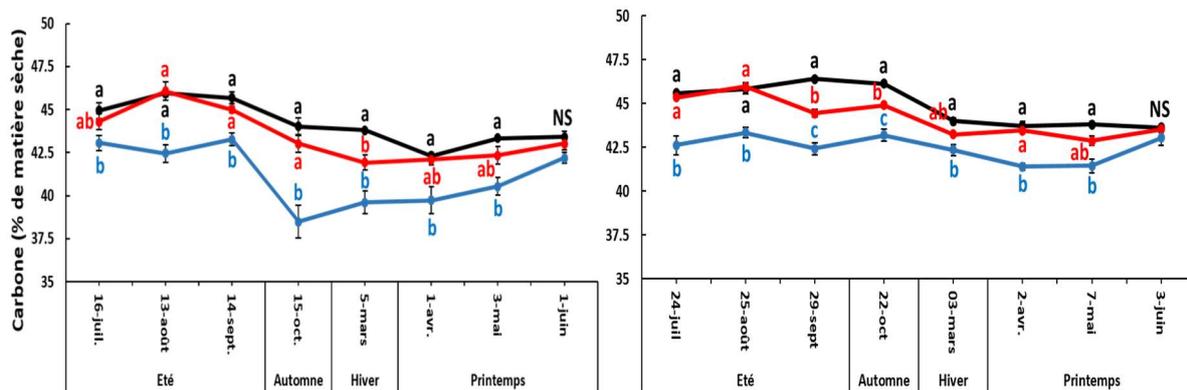


Figure 24 : Dynamique temporelle de la teneur en carbone total mesurée après repousse (%), en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après 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.

Sur le parc, en conditions hors exclos, la teneur en carbone total de la végétation dans le parc des deux sites présente la même réponse qu'en exclos ainsi que la même teneur en carbone à chaque date (Figure 25). Uniquement en mai sur Braize, le contrôle présente une valeur plus faible dans le parc qu'en exclos, et avec une hétérogénéité plus importante. La baisse sous panneaux pourrait être liée

au stade phénologique des plantes (ratio feuilles/tiges), aux espèces présentes ainsi que probablement une plus faible concentration en sucres totaux, compte tenu des conditions de lumière très faibles.

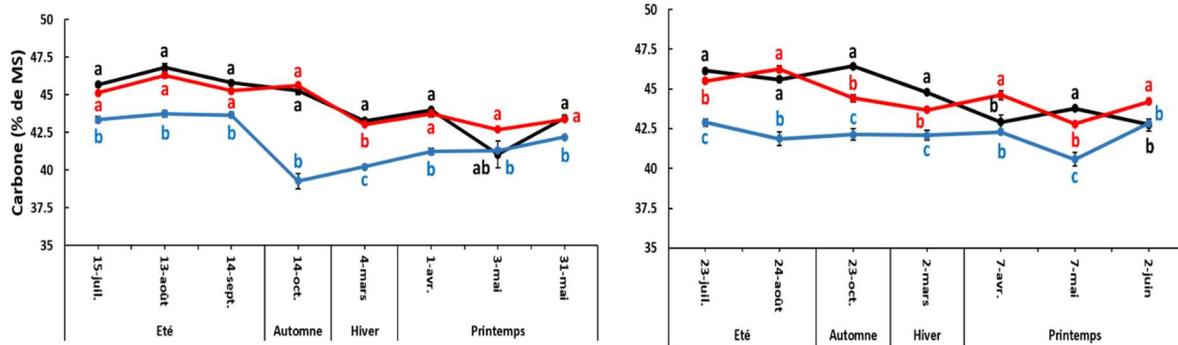


Figure 25 : Dynamique temporelle de la teneur en carbone total (%) mesurée dans le parc, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de 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.

En zone d'exclos, bien que, la végétation à l'ombre des panneaux ait une teneur en carbone total inférieure, la teneur en fibres totales (cellulose, hémicellulose, lignine) est 1.1 à 1.2 fois plus élevées sous les panneaux en moyenne sur l'année par rapport au contrôle (Braize :  $P = 59.87 \pm 0.65$  % de MS ; C =  $51.75 \pm 1.27$  % de MS ; Marmanhac :  $P = 56.19 \pm 0.68$  % de MS ; C =  $51.09 \pm 0.80$  % de MS) (Figure 26). Ce résultat est cohérent avec la composition botanique puisqu'il y a une majorité de poacées à l'ombre des panneaux et qui comportent plus de fibres que les dicotylédones et fabacées.

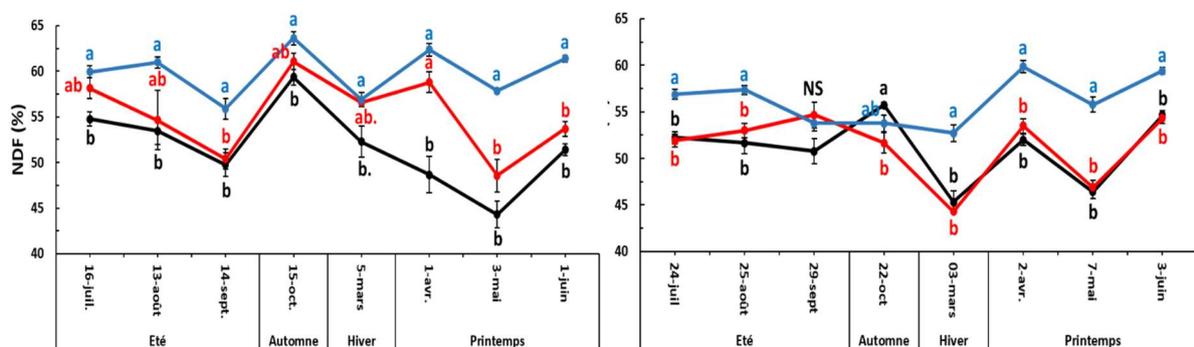


Figure 26 : Dynamique temporelle de la teneur en fibres totales mesurée après repousse (NDF, %) en exclos, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) 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.

Sur le parc, hors exclos et pour les deux sites, la teneur en fibres totales (NDF) ne présente pas la même réponse qu'en exclos, notamment de l'été à la fin de l'hiver. Sur Braize, elle est supérieure en inter-rangée et en contrôle par rapport à la végétation sous les panneaux jusqu'à la fin de l'hiver (Figure 27). Sur Marmanhac, elle est plus élevée en inter-rangée et en contrôle en août et en mars, par rapport à l'exclos, amenant à des valeurs égales à celles mesurée sous les panneaux. De plus, la teneur en NDF sous les panneaux est similaire en exclos et dans le parc. Cette différence de réponse sur les deux sites par rapport à l'exclos en inter-rangée et en contrôle provient de la teneur en NDF qui est supérieure lors de ces périodes par rapport à l'exclos. Cette teneur en NDF supérieure peut provenir d'état de la végétation en termes de phénologie (stade reproducteur, rapport feuilles/tiges)

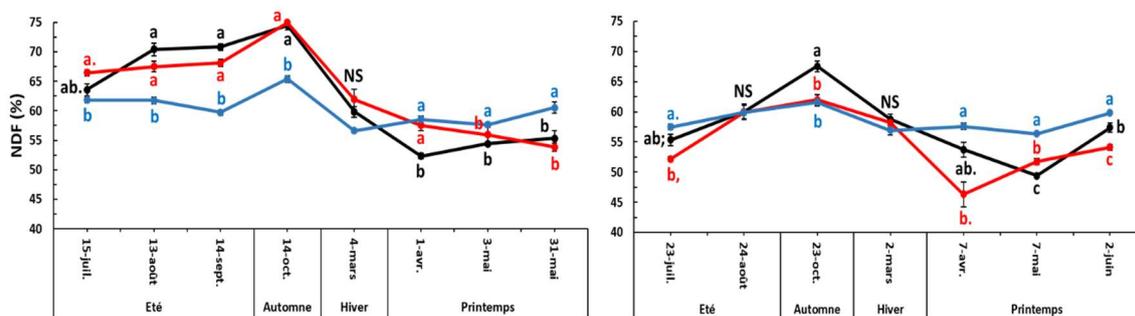


Figure 27 : Dynamique temporelle de la teneur en fibres totales (NDF, %), mesurée dans le parc, et pour chaque traitement, sur le site de Braize (gauche) et sur le site de Marmanhac (droite). Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le 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.

Pour les deux sites et les deux zones étudiées (exclus et parc), la végétation présente sous les panneaux possède plus de matières azotées et moins de carbone total. Selon plusieurs études (Buxton et Fales 1994 ; Kephart 1987), l'augmentation de la teneur en N total serait liée à une concentration de l'azote dans des cellules de plus petits volumes. La diminution probable de la photosynthèse sous ombrage a des effets directs sur l'allocation du C fixé par photosynthèse et qui serait préférentiellement alloué à la formation de tissus de soutien (NDF) au détriment de la production de sucres solubles. Ceci est cohérent avec la croissance en hauteur plus importante (étiolement) comme observé sous les panneaux. La réponse pour les fibres totales est variable selon l'état de la végétation, mais cette réponse est essentiellement liée aux variations observées sur le témoin et l'inter-rang. En effet, la gestion de la végétation a des effets très marqués sur des déterminants majeurs de la qualité du fourrage, que sont le stade phénologique, le rapport feuilles/tiges, les espèces présentes.

Dans les parcs photovoltaïques, les modifications importantes du microclimat de la végétation induisent une diversité élevée de la quantité et de la qualité du fourrage qu'offrent peu ou pas les prairies sans ombrage.

### Impact des ovins et comportement

Les ovins impactent logiquement la quantité de biomasse produite ainsi que le stock de fourrage dans le parc par leur piétinement et leur consommation. Cependant, il est observé que la consommation de fourrage n'avait pas la même intensité entre les traitements en fonction des périodes de l'année. Les moutons de septembre à octobre sur Marmanhac ainsi que d'avril à juin sur les deux parcs semblent présenter une intensité de pâturage plus importante en inter-rangée que sous les panneaux. La consommation en contrôle n'est pas estimable à cause de l'hétérogénéité trop importante masquant soit une productivité très hétérogène dans le parc soit des zones plus ou moins pâturées en contrôle. Une modification du protocole expérimental d'échantillonnage est à prévoir pour prendre en compte l'hétérogénéité en contrôle sur les deux parcs.

### Botanique et diversité spécifique

La diversité gamma ( $\gamma$ ) est l'ensemble des espèces présentes dans un lieu défini, ici la zone d'exclus. La diversité alpha ( $\alpha$ ) est le nombre d'espèces rencontrées dans un habitat au sein de l'exclus, ici les trois traitements.

Braize

Sur le site de Braize, en été 2020, la zone en exclos présente une diversité  $\gamma$  (gamma) de 35 espèces. La richesse spécifique moyenne par transect (1.5 m<sup>2</sup>) est similaire entre traitements (Figure 28). Elle varie de 14 espèces pour l'inter-rangée et sous les panneaux à 15 espèces en contrôle. Cependant, c'est sous les panneaux que la diversité  $\alpha$  (alpha) du traitement est la plus grande avec 27 espèces correspondant à 77 % de la diversité  $\gamma$ . C'est aussi le traitement le plus variable spatialement avec 53 % d'espèces de la diversité  $\alpha$  présents par transect. L'inter-rangée est le traitement le moins riche en espèces avec 54 % de la diversité  $\gamma$  (19 espèces). Le traitement est moins variable spatialement car 74 % de sa diversité  $\alpha$  est présente par transect. En contrôle, 63 % de la diversité  $\gamma$  est présente (22 espèces). 68 % de la diversité  $\alpha$  du traitement se retrouve par transect.

En automne 2020, la diversité  $\gamma$  de la zone en exclos est de 31 espèces. C'est essentiellement sous les panneaux que la diversité spécifique a diminué pour présenter 65 % de la diversité  $\gamma$  (20 espèces). La diversité  $\alpha$  de l'inter-rangée (18 espèces) et du contrôle (19 espèces) sont similaires à celle sous les panneaux. La richesse spécifique par transect plus faible de 2 à 3 espèces qu'en été ne semble pas différer en moyenne entre traitement avec 12 espèces en contrôle et sous les panneaux et 13 en inter-rangée. Par transect, plus de la moitié de la diversité  $\alpha$  par traitement est présente (C : 63% ; I : 72 % ; P : 60%). Les espèces présentes sont moins variable entre transect de l'inter-rangée.

Au printemps 2021, la diversité  $\gamma$  de la zone en exclos est de 38 espèces. 74 % de ces espèces composent la diversité  $\alpha$  du traitement Panneaux (28 espèces) contre 66 % en inter-rangée (25 espèces) et 55 % en Contrôle (21 espèces). En moyenne par transect, 65.7 % de la diversité  $\alpha$  des traitements est présente. La moyenne de la richesse spécifique ne diffère pas entre traitements avec 18 espèces sous les panneaux, 17 en inter-rangée et 14 en contrôle. Ceci vient de la variabilité entre transect, effectivement, sous les panneaux la richesse spécifique par transect varie de 15 à 22 espèces et de 12 à 16 espèces en contrôle.

### Conclusions Braize

Les espèces retrouvées sous les panneaux semblent être plus nombreuses entre transects notamment en été et automne 2020. A l'inverse, la végétation est plus homogène en inter-rangée notamment en été et automne 2020. La richesse spécifique par transect est équivalente entre les traitements quel que soit la saison, même si, au printemps, la richesse spécifique est plus variable entre transects.

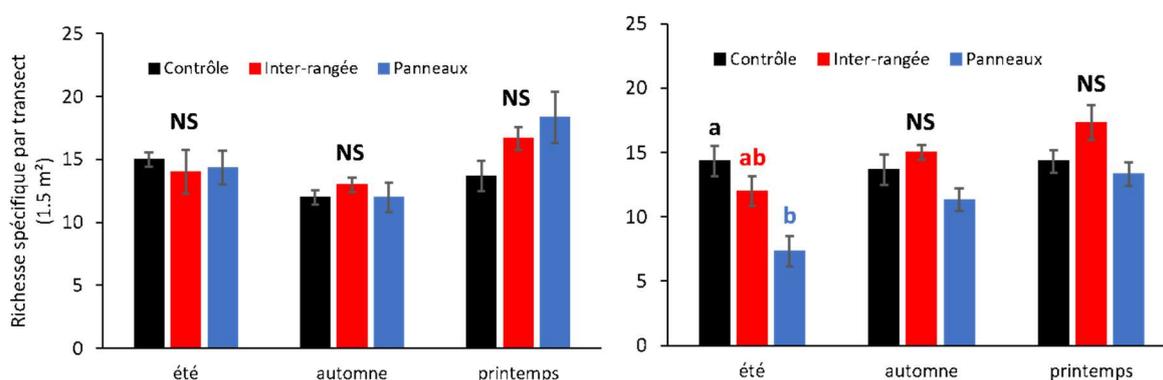


Figure 28 : Richesse spécifique moyenne par transect ( $\pm$  erreur standard) en fonction des sites (Gauche : Braize ; Droite : Marmanhac), des saisons et des traitements. Pour chaque saison, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) d'après le test de Kruskal-Wallis et le test post-hoc de Dunn ; NS :  $P > 0.05$ . Légende : bleu : Panneaux ; rouge : Inter-rangée ; noir : Contrôle.

## Marmanhac

Sur le site de Marmanhac, en été 2020, la zone en exclos présente une diversité  $\gamma$  (gamma) de 26 espèces. 77 % de la diversité  $\gamma$  compose la diversité  $\alpha$  du traitement contrôle (20 espèces) (Figure 28). L'inter-rangée est composée de 62 % de la diversité  $\gamma$  (16 espèces) alors que sous les panneaux, le traitement possède une diversité  $\alpha$  présentant 46 % des espèces de la diversité  $\gamma$  (12 espèces). Les traitements Contrôle et Inter-rangée, deux fois plus riches avec 14 et 12 espèces par transect (1.5 m<sup>2</sup>), sont moins variables spatialement (72 et 75 % de la diversité  $\alpha$ ) que le traitement panneaux qui a 61 % de sa diversité  $\alpha$  présente par transect avec une richesse spécifique moyenne uniquement de 7 espèces et différente du traitement contrôle.

En automne 2020, la zone en exclos présente une diversité  $\gamma$  de 25 espèces. 80 % des espèces sont présentes en inter-rangée (20 espèces) contre 68 % en contrôle (17 espèces) et panneaux (17 espèces). Cependant, le traitement contrôle et inter-rangée semble avoir une richesse spécifique moyenne par transect semblable avec 14 et 15 espèces ce qui représente 80 et 75 % de leur diversité  $\alpha$ . Sous les panneaux, la moyenne de la richesse spécifique ne diffère pas des autres traitements bien qu'elle soit de 11 espèces ce qui représente 67 % de la diversité  $\alpha$  du traitement. La richesse spécifique par transect est variable au sein des traitements.

Au printemps 2021, la zone en exclos présente une diversité  $\gamma$  de 31 espèces. 71 % de cette diversité se retrouve dans la diversité  $\alpha$  des traitements Inter-rangée et Panneaux avec 22 espèces. La diversité  $\alpha$  en contrôle représente 58 % de la diversité  $\gamma$  (18 espèces). La variabilité de la richesse spécifique moyenne par transect ne permet pas d'affirmer de différence entre traitements. Le traitement inter-rangée avec une moyenne de 17 espèces est aussi peu variable spatialement entre transects qu'en contrôle qui comporte en moyenne 14 espèces avec 79 % de la diversité  $\alpha$  retrouvé par transect. Sous les panneaux, la richesse spécifique moyenne est de 13 espèces et la composition botanique est la plus diversifiée par transect avec 61 % de la diversité  $\alpha$  présente.

## Conclusions Marmanhac

La diversité  $\alpha$  la plus importante varie entre les traitements en fonction des saisons. Cependant, c'est sous les panneaux que la flore est la plus diversifiée entre les transects quelle que soit la saison bien qu'elle soit moins riche en été.

## Conclusions sur la diversité végétale

La végétation présente par transect sous les panneaux semble être la plus hétérogène. Les espèces rencontrées sous les panneaux varient spatialement sur les deux sites. Cependant, la diversité  $\alpha$  du traitement sous panneaux est variable entre les sites. Sur Marmanhac, la diversité  $\alpha$  semble inférieure à équivalente par rapport aux autres traitements. Sur Braize, c'est l'inverse, la diversité  $\alpha$  sous les panneaux semble équivalente à supérieure. Cette différence pourrait venir de l'ancienneté du site.

Effectivement, la présence des panneaux solaires pourrait impacter la dispersion et le recrutement de nouvelles graines. Les tables pourraient limiter voire empêcher la dispersion zoochore et anémochore. Ceci pourrait à terme diminuer la banque de graine des sols.

## Rappel des effets marquants

- La quantité de lumière sous les panneaux est diminuée de 90 à 94 % selon les saisons
- Le taux d'humidité du sol entre les traitements varie en fonction de la texture du sol et des précipitations. Le gain en humidité lors de précipitations est amoindri sous les panneaux.
- La température du sol est plus fraîche sous les panneaux lors de forte chaleur et ensoleillement. En hiver, c'est en inter-rangée que la température du sol est plus fraîche. Les températures remontent plus lentement sous les panneaux.
- La croissance de la végétation est plus importante à l'abri des panneaux sauf en période d'arrêt de la croissance lié au climat.
- La reprise de la croissance est plus précoce et plus rapide sous les panneaux au début du printemps et celle-ci est prolongée d'un mois en automne sur le site de plaine sous les panneaux.
- Les panneaux permettent une protection de la végétation et une meilleure productivité durant des événements de sécheresse (observations faites en exclos).
- L'indice NDVI mesuré à l'ombre des panneaux est plus faible notamment en automne et hiver alors que la teneur en azote de la végétation est plus importante. Ceci s'explique par la présence de sol nu présent sous les panneaux quelle que soit la période de l'année
- Pour les deux sites, il y a un plus fort taux de recouvrement de mousse en inter-rangée quelle que soit la période de l'année.
- Sur l'année, le cumul de biomasse de repousse sans influence du pâturage est similaire entre la zone Contrôle et les zones avec influence de la présence des panneaux solaires (Panneaux et Inter-rangée), seule la réponse de l'inter-rang varie entre site.
- En exclos, la végétation sous les panneaux présente un taux d'azote plus élevé mais en même temps plus fibreuses, alors que la végétation qui pousse à la lumière est plus riche en carbone total. Dans le parc, la réponse change pour le NDF car le NDF mesuré en contrôle et inter-rang est plus grand. Ceci s'explique par la gestion appliquée sur la végétation dans les deux zones du parc qui modifie le stade phénologique, le ratio feuilles/tiges et les espèces présentes.
- La diversité  $\alpha$  des traitements est variable entre site et entre saisons. Elle tend à être inférieure sous les panneaux sur Marmanhac mais supérieure sur Braize.
- La richesse spécifique moyenne par transect ( $1.5 \text{ m}^2$ ) ne diffère pas entre traitements, sauf en été sur Marmanhac.
- Les espèces végétales rencontrées sous les panneaux sont plus diversifiées spatialement.

## A surveiller

(Illustration 7)

- Evolution de la quantité de sol nu sous les panneaux pouvant être liée à la contrainte de la limitation en rayonnement mais aussi à l'effet splash lors de précipitations et des perturbations ovines (couchage).
- Evolution de la quantité de mousses en inter-rangée pouvant être liée à l'effet couloir entre les rangées de panneaux solaires sur l'état du sol mais aussi par rapport au microclimat (plus humide, moins venté).
- [Hors exclos] Evolution de la présence d'espèces telles que le jonc, les fougères, orties et ronces paraissant proliférantes notamment sous les panneaux solaires.
- Evolution à long terme de la diversité  $\alpha$  qui pourrait diminuer sous les panneaux.



*Illustration 7 : Photographies montrant les effets à surveiller. A) Sol nu lié à l'effet « splash » sous panneaux ; B) Sol nu lié aux perturbations ovines sous panneaux ; C) Mousse (vert clair) en inter-rangée ; D) Espèces proliférantes sous panneaux non désirés pour le pâturage (fougère et jonc)*

## Références

Buxton, D.R. et Fales, S.L. (1994). Plant Environment and Quality. Chapter 4 in Forage Quality, Evaluation, and Utilization, G.C. Fahey (Ed.). <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c4>

Kephart, K. D. (1987). Irradiance level effects on plant growth, nutritive quality, and energy exchange of C3 and C4 grasses. *Retrospective Theses and Dissertations*. 8551. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/8551>

Madej L. (2020). Dynamique végétale sous l'influence de panneaux photovoltaïques sur deux sites prairiaux pâturés. Rapport de stage, Master 2 PNB : Patrimoine Naturel et Biodiversité, Université de Rennes 1, 25pp.

## Remerciements

Laurence Andanson (UREP VetAgro Sup) pour sa contribution aux analyses C et N, Sandrine Revaillet (UREP) pour ses conseils en analyses NDF, Isabelle Bosio pour ses conseils pour le traitement des échantillons de sol et l'ensemble des collègues de l'UREP pour les échanges fructueux.