

RÉPONSES CONTRASTÉES DE PRAIRIES À FAIBLE POTENTIEL DE PRODUCTION EN CONDITIONS AGRIVOLTAIQUES

Mise en situation

Les systèmes agrivoltaïques présentent un potentiel d'adaptation aux effets du changement climatique car l'ombrage pourrait ralentir le dessèchement de la végétation. Néanmoins, la réduction du rayonnement de près de 90% sous panneaux solaires fixes questionne la viabilité des plantes et des prairies dans ces conditions.

Résumé

Dans les systèmes agrivoltaïques associant sur une même surface les productions électrique et agricole, la fourniture des services écosystémiques par les prairies pourrait être modifiée. Une analyse bibliographique et des études expérimentales menées sur six sites en France ont permis d'évaluer les effets des panneaux solaires sur le microclimat, la quantité et la qualité du fourrage, et la composition floristique de prairies faiblement productives. Le microclimat sous panneaux solaires est modifié sur tous les sites. En particulier, les effets de la réduction de lumière impactent la température du sol (baisse de 2 à 5°C en période estivale). La dynamique de l'humidité du sol sous panneaux reste cependant variable selon les sites. Sous exclos de pâturage, la production de biomasse diminue (-50% en moyenne) sous les panneaux solaires pour deux des six sites, qui ont un taux de couverture > 50%. La qualité fourragère est plus riche en azote total sous panneaux sur tous les sites avec peu d'effets marqués sur les fibres. De plus, on observe sur trois sites une modification de la composition floristique. Ces résultats mettent en évidence des patrons de réponse variables qui peuvent s'expliquer à la fois par un certain nombre de facteurs comme la dimension des structures photovoltaïques, les conditions pédoclimatiques (fertilité des sols, disponibilité en eau), l'historique des parcelles ou la composition botanique. Ces études nécessitent d'être poursuivies afin de prendre en compte l'effet de la variabilité interannuelle du climat sur les propriétés des prairies ainsi que sur l'ensemble des services rendus en présence de panneaux solaires qui ont une durée de vie de 30 à 40 ans.

Summary

Contrasting response of grasslands with low potential production under agrivoltaic conditions

In agrivoltaic systems combining electrical and agricultural production on the same surface, the provision of ecosystem services by grasslands could be modified. A literature review and experimental studies carried out at six sites in France have enabled us to assess the effects of solar panels on the microclimate, forage quantity and quality, and floristic composition of low productive grasslands. The microclimate under solar panels was modified at all sites. In particular, the effects of reduced light have an impact on soil temperature (a drop of 2 to 5°C in summer period). However, the response of soil moisture under the panels varies from site to site. Under grazing exclosures, biomass production decreased (-50% on average) under solar panels for two of the six sites, which have a solar panel ground cover > 50%. Forage quality is higher in total nitrogen under the panels at all sites, with little effect on fiber. Three sites also showed a change in floristic composition. These results highlight variable response patterns that can be explained by a number of factors, such as the size of the photovoltaic structures, pedoclimatic conditions (soil fertility, water availability), plot history or botanical composition. These studies need to be continued in order to consider the effect of inter-annual climate variability on grassland properties, as well as on the overall services in the presence of solar panels, which have a lifespan of 30 to 40 years.

Auteurs

Picon-Cochard C¹., Stepec A².,
Gaulier M²., Berezyiat N¹., Payet
S¹., Colas V²., Gérardin T².,
Combes D².

¹UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE, INRAE,
VETAGRO SUP, UREP, CLERMONT-FERRAND
63000, FRANCE.

²INRAE - CENTRE DE RECHERCHE
NOUVELLE-AQUITAINE-POITIERS - UNITÉ DE
RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE PRAIRIES ET
PLANTES FOURRAGÈRES, LE CHÊNE - RD
150, CS 80006, 86600 LUSIGNAN.

Auteur correspondant:

catherine.picon-cochard@inrae.fr

Mots clés

fourrage, groupes fonctionnels,
rayonnement, humidité et
température du sol, panneaux
photovoltaïques

Key words

forage, functional groups, light,
soil humidity and temperature,
solar panels

Références de l'article

Picon-Cochard C., Stepec A.,
Gaulier M., Berezyiat N., Payet
S., Colas V., Gérardin T., Combes
D. (2025). Réponses contrastées
de prairies à faible potentiel
de production en conditions
agrivoltaïques, (2025). *Fourrages*
262, Pages, 77-89.

Article accepté pour publication le
10 avril 2025

1. Introduction

Dans les prochaines décennies, l'agriculture va inévitablement faire face à des enjeux globaux grandissants, notamment liés au changement climatique. D'après le GIEC, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 8% des terres agricoles actuelles deviendront climatiquement inadaptées d'ici 2100. Ce chiffre atteint même 30% dans le scénario le plus pessimiste. Dès aujourd'hui, il est urgent de trouver des solutions permettant à l'agriculture de s'adapter à un nouveau contexte climatique, marqué par l'intensification des épisodes météorologiques extrêmes. L'agrivoltaïsme se positionne comme l'une des solutions potentielles. Comme l'agroforesterie, il combine deux productions différentes sur une même surface, en utilisant le principe d'étagement, les strates inférieures se retrouvant ainsi ombragées (Dupraz, *et al.*, 2011).

En plus de l'ombre reçue par les plantes sur tout ou partie de la journée (Sturchio *et al.*, 2022), la présence de panneaux photovoltaïques peut influencer différents paramètres du microclimat : vitesse et direction du vent (Hassanpour Adeh *et al.*, 2018 ; Bruhwylér *et al.*, 2023), température du couvert végétal (Marrou *et al.*, 2013), température et humidité de l'air et du sol (Armstrong *et al.*, 2016 ; Hassanpour Adeh *et al.*, 2018 ; Graham *et al.*, 2021 ; Weselek *et al.*, 2021 ; Madej *et al.*, 2024 ; Sturchio *et al.*, 2022 ; Kannenberg *et al.*, 2023).

L'impact des panneaux solaires sur les variables microclimatiques dépend de nombreux facteurs : météorologie, sol, type de panneaux et dimensions de l'infrastructure, période de l'année (différence entre saisons). Ces variations microclimatiques ont un effet sur le fonctionnement des couverts végétaux à travers les processus écophysologiques tels que la photosynthèse, la photomorphogénèse et ceux impliqués dans l'acquisition des ressources (lumière, eau, nutriments) (ex. Barron-Gafford *et al.*, 2019). Selon l'effet sur ces processus, le rendement de la culture peut être impacté négativement ou positivement voire sans effet par rapport au témoin sans panneaux. En effet, une croissance en hauteur plus importante a été observée sur des prairies dans la zone d'influence des panneaux au détriment du tallage, de la densité du couvert et du ratio feuilles/tiges (Madej *et al.*, 2024 ; Rainon et Dagouneau, 2022). Ceci peut s'expliquer par le phénomène d'étiollement chez les graminées qui recherchent un meilleur accès à la lumière en réponse à l'ombrage pour lequel la lumière diffuse est dominante.

Lors d'une expérimentation portant sur des panneaux inclinés fixes implantés sur une prairie semi-aride dans l'Oregon, et ayant un inter-rang de 3 mètres, Hassanpour Adeh *et al.* (2018) ont mesuré une augmentation du rendement par rapport à la modalité sans panneaux. Lors d'une récolte ponctuelle en fin d'été, ils ont mesuré 90 % de productivité en plus sous les panneaux par rapport au contrôle non couvert. Toutefois, le suivi dans le temps réalisé par Andrew *et al.* (2021) sur le même dispositif expérimental mais

sur deux autres années a montré une production de biomasse significativement inférieure sous les panneaux par rapport à la zone contrôle et à la zone d'inter-rang, qui n'étaient pas différentes entre elles. Cette dernière étude estime entre 9 et 33 % la perte globale de rendement en herbe sur la prairie photovoltaïque par rapport à une prairie sans panneaux. Cette baisse de productivité a été confirmée par la suite lors d'une expérience d'implantation de différents mélanges prairiaux entre les lignes de panneaux du dispositif, concluant à une perte moyenne de rendement du système agrivoltaïque de 31 % (Andrew *et al.*, 2024). Dans le même sens, en Californie, Kampherbeek *et al.* (2023) relèvent une production 47 % plus élevée sur une prairie naturelle par rapport à une centrale photovoltaïque au sol installée sur un pâturage ovin attenant. Au Royaume-Uni, sur une prairie semée couverte de panneaux fixes inclinés avec un inter-rang de 7,4 m, Armstrong *et al.* (2016) évoquent une production de biomasse aérienne en début d'été quatre fois inférieure sous les panneaux par rapport aux inter-rangées et aux zones témoin pleinement exposées (qui n'étaient pas différentes entre elles). Des panneaux ont été implantés sur une prairie permanente semi-aride dans le Colorado avec pour inter-rang 3,2 m, à plus de 1500 m d'altitude, en conditions froides et sèches (Sturchio *et al.*, 2024). Il n'y avait pas de différence significative de production de biomasse entre la zone couverte par les panneaux et le contrôle. L'étude conclut donc au maintien de la productivité et de la qualité fourragère de la prairie suite à l'installation des panneaux photovoltaïques. Enfin, en France, lors d'un suivi réalisé sur deux parcelles de prairie avec panneaux photovoltaïques inclinés situées dans l'Allier et le Cantal, la production annuelle de biomasse n'a pas semblé fortement impactée par la présence des panneaux solaires (Madej *et al.*, 2024). De plus, des études menées dans des systèmes agroforestiers ou de savanes lorsqu'un couvert végétal fait de l'ombre à un autre plus petit, ont montré que la réponse de la biomasse à l'ombrage peut être modulée par les disponibilités en eau et en azote (Cruz, 1997 ; Ludwig *et al.*, 2001).

De nombreux facteurs peuvent jouer sur la production végétale. Dans le cas d'une prairie, les principaux facteurs limitants vont être la lumière, l'eau et l'azote. Des études ont notamment montré que pour la production de fourrage en condition d'ombrage, la lumière sera l'élément limitant principal (Dodd *et al.*, 2005). Comme vu précédemment, la réponse de la prairie dans un système agrivoltaïque est très variable, pour un site donné, et il est difficile d'identifier un facteur unique limitant. Dans le cas des deux études présentées ci-dessus (Andrew *et al.*, 2021 et Kampherbeek *et al.*, 2023) montrant une diminution du rendement fourrager dans des conditions climatiques similaires (tempéré méditerranéen), une hypothèse possible est que le facteur limitant soit la pression de pâturage. En effet, les études sur le comportement des ovins dans les parcs agrivoltaïques ont montré que les brebis broutaient plus sur les parcs que dans les prairies naturelles (Kampherbeek *et al.*, 2023) et qu'elles cherchaient l'ombre sous les panneaux durant les périodes chaudes et ensoleillées (Deiss, 2023). De plus, l'étude

d'Hassanpour Adeh *et al.* (2018), réalisée sur le même site que celle d'Andrew *et al.* (2021), mais cette fois sans pression de pâturage, montre une augmentation du rendement fourrager sous panneaux. Il a été mis en évidence que le piétinement des troupeaux peut provoquer des tassements (Drewry, 2006) et réduire de 4 à 39% la production annuelle de biomasse de certaines plantes pérennes telles que le ray-grass (Edmond, 1964).

Concernant la qualité de la production, les études disponibles tendent à montrer une meilleure valeur fourragère des prairies en situation agrivoltaïque à travers l'augmentation du taux d'azote/protéines (Madej *et al.*, 2024 ; Sturchio *et al.*, 2024) et, en complément, de la valeur énergétique (Andrew *et al.*, 2021) ou de la digestibilité (Kampherbeek *et al.*, 2023). La qualité fourragère de ces prairies par rapport au contrôle non couvert peut néanmoins varier selon la zone considérée, la période de l'année et l'année elle-même (Andrew *et al.*, 2021 ; Madej *et al.*, 2024 ; Sturchio *et al.*, 2024). La valeur fourragère comme la productivité de la prairie sont également analysées à travers la composition botanique du couvert. Dans le Sud-Ouest de l'Allemagne, dans une prairie temporaire constituée d'un mélange trèfle-graminées implantée sous une ombrière photovoltaïque, une perte de rendement a été observée (Weselek *et al.*, 2021). Cette perte de rendement était accompagnée d'une augmentation de la proportion de trèfle dans le couvert végétal par rapport au témoin non influencé par les panneaux solaires. Dans certains cas, il a été observé une perte de diversité végétale sous les panneaux au profit des graminées avec des légumineuses totalement absentes (Armstrong *et al.*, 2016). Dans la zone entre les panneaux, la composition botanique différait également du contrôle mais de manière moins marquée, les légumineuses et les diverses

étant bien présentes, et sans conséquences sur le rendement. Dans les études d'Andrew *et al.* (2021, 2024), l'ensemble des dicotylédones fourragères a semblé être désavantagé dans la zone d'influence des panneaux. Pour Hassanpour Adeh *et al.* (2018), la prairie permanente dans son système agrivoltaïque présentait moins de diversité et une composition botanique différente de la zone de contrôle mais en faveur d'une espèce plutôt intéressante par sa bonne appétence.

Notre étude contribue à une meilleure compréhension de cette variabilité de réponse en intégrant des parcs ayant des configurations différentes de panneaux, d'âge de centrale, de pédoclimats et de végétation. L'objectif de cet article est d'analyser la variabilité intra-annuelle de la quantité et la qualité du fourrage ainsi que la composition botanique dans le cadre de plusieurs zones pédoclimatiques et conditions d'ombrage créées par différentes configurations agrivoltaïques. Pour répondre à cet objectif, six sites répartis dans différentes régions de France ont servi de support pour acquérir des données expérimentales.

2. Matériel et méthode

2.1- Présentation des parcs étudiés

Les suivis agronomiques ont été réalisés sur des parcs photovoltaïques, dont les localisations sont représentées sur la carte ci-dessous à l'aide d'une numérotation allant de 1 à 6 (Figure 1).

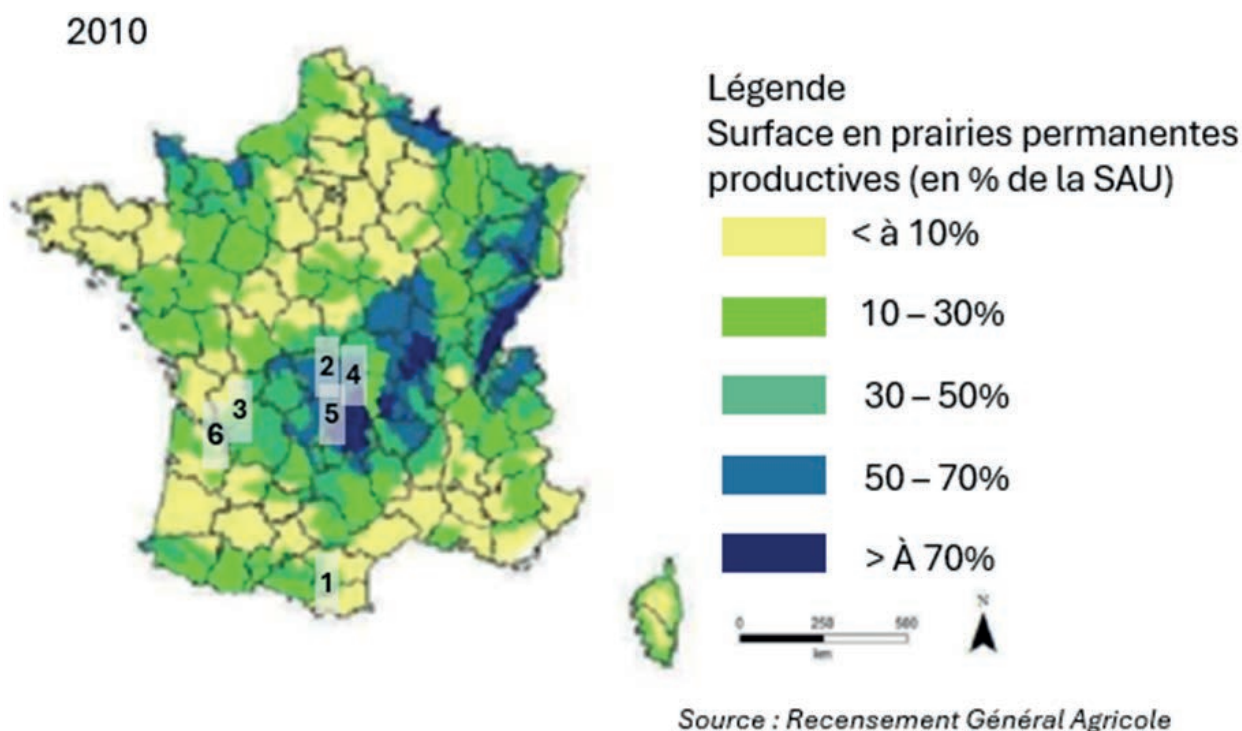


Figure 1 : Carte de distribution des prairies permanentes productives en France métropolitaine (Source : Recensements général agricoles) sur laquelle sont positionnés les 6 parcs étudiés.

Figure 1: Map showing the distribution of productive permanent grassland in France (Source: General Agricultural Census), on which the 6 study sites are positioned. Area of productive permanent grassland (% of UAA).

Les prairies en conditions agrivoltaïques

Dans la suite de l'étude, nous utiliserons ces numéros pour faire référence aux différents parcs. Le fond de carte utilisé représente la part qu'occupent les prairies permanentes productives dans la surface agricole utile totale. Au moment des études, les parcs étaient dominés par une végétation herbacée et pâturée par des ovins. Les parcs possèdent des caractéristiques différentes : pédoclimat (tableau 1) et caractéristiques techniques (tableau 2).

*Le taux d'occupation au sol (TOS) défini par le décret agriPV du 8 avril 2024 a été calculé selon la méthode donnée dans le livret d'instruction technique DGPE/SDPE/2025-93 du décret n°2024-318 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers. Le calcul est le suivant : surface PV projetée / (surface PV projetée + surface occupée par les inter-rangs) *100.

Tableau 1 : Caractéristiques pédoclimatiques des parcs.

Table 1: Pedoclimatic characteristics of the parks.

Caractéristiques	Parc 1	Parc 2	Parc 3	Parc 4	Parc 5	Parc 6
T. air (°C) moy annuelle	14.5	12.1	14.0	11.0	10.5	15.2
Précipitations (mm) annuelles	482	520	864	656	1231	528
Type de climat	Méditerranéen à influence océanique	Continental	Océanique	Continental	Influence océanique et montagnarde	Océanique
Type de sol	Limoneux	Limoneux-argileux	Calcaire	Sablo-limoneux	Andosol	Sablo-argileux
Type de végétation	Flore annuelle commensale	Pelouses médio-européennes	Pelouse calcicole	Semis : trèfle, ray-grass, fétuque	Cortèges floristiques forestiers non humides & rudérales	Friche depuis 10 ans dominée par des herbacées
Années de mesure de biomasse	2023 et 2024			2020 à 2023		2022 et 2023
Années de mesure qualité M	2023			2021 à 2023		2022 et 2023
Mesures micro-climatiques	juin 2023 à décembre 2024			juin 2020 à fin 2023		2022 et 2023

Tableau 2 : Caractéristiques des structures des panneaux

Table 2: Characteristics of panels structures

Caractéristiques	Parc 1	Parc 2	Parc 3	Parc 4	Parc 5	Parc 6
Année de mise en service	2010	2020	2021	2018	2014	2017
Surface (ha)	17	7	8	17	13	2.82
Localisation	Aude	Allier	Dordogne	Allier	Cantal	Gironde
Altitude (m)	164	258	190	235	840	30
Point bas des panneaux (m)	0.86	0.8	0.8	0.8	0.7	1.0
Point haut des panneaux (m)	2	2.6	2.8	3.1	2.1	2.66
Inter-rang (m)	2.97	3.31	6.2	4	1.9	4
Inclinaison des panneaux (°)	25	20	25	25	25	-45 à +45
Taux d'occupation au sol* (TOS, %)	51	59	38	47	61	45-57**
Type de panneaux	Fixes					Mobiles, monopieux
Orientation des panneaux	Sud					Est-Ouest

Dans le tableau 2, en parc 6, le calcul a intégré toutes les positions possibles d'inclinaison ou de rotation des panneaux.

** : le premier chiffre correspond au taux de couverture brut (panneaux à plat) et le deuxième chiffre au taux de couverture corrigé selon un gain de capture du rayonnement de 0.25 (Klyk et al., 2024).

2.2- Protocole de suivi

Au sein des centrales, des zones de suivis ont été définies selon le niveau de rayonnement :

- **Niveau de rayonnement minimal** : zone sous les panneaux solaires
- **Niveau de rayonnement intermédiaire** : zone au milieu de l'inter-rang
- **Niveau témoin** : zone non influencée par l'ombrage des panneaux solaires (Annexe)

Dans la suite de l'article, le mot inter-rang fera référence à la distance bord à bord des panneaux.

Afin de permettre la comparaison des sites, nous avons converti les niveaux de rayonnement en un pourcentage d'ombrage. Pour cela, nous avons utilisé les données de rayonnement mesurées in situ pour calculer un ratio d'ombrage mensuel de mars à novembre, avant d'en faire la moyenne globale.

2.3- Suivi des conditions microclimatiques

Des stations météo ont été installées sur chaque parc solaire et placées dans les différentes zones d'étude précédemment définies. Les variables microclimatiques suivantes ont été mesurées en continu avec un pas de temps de 15 minutes pendant au moins 2 ans sur chacun des sites : rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), température de l'air, température et l'humidité du sol à l'aide de capteurs situés à 20 cm de profondeur. Sur les parcs 1 et 2, les capteurs sont reliés à une centrale Agriscope®, pour le parc 3 à une centrale Meter®. Enfin, sur les parcs 4 à 6, les capteurs sont reliés à une centrale Campbell®. Pour chaque site, un capteur de PAR et un capteur de température de l'air ont été installés entre 30 et 50 cm de haut sous panneaux et dans l'inter-rang. En zone témoin, ces capteurs ont été installés soit à 1 m (sites 4, 5, 6) soit à 2 m (sites 1, 2, 3) afin d'éviter toute interférence avec la mesure.

La réserve en eau du sol (REW, sans unités) a été calculée pour chaque site selon l'équation :

$$REW = \frac{H_{sol\ mes} - H_{sol\ min}}{H_{sol\ max} - H_{sol\ min}}$$

avec $H_{sol\ mes}$ (%) : humidité du sol mesurée au temps t , $H_{sol\ min}$ (%) : humidité du sol minimale mesurée sur le site, $H_{sol\ max}$ (%) : humidité du sol maximale mesurée sur le site (Granier et al., 1999). Les moyennes mensuelles ont été utilisées pour calculer la REW moyenne pour chaque site.

En période estivale, les valeurs $H_{sol\ min}$ atteintes ont été comprises entre 4.1% (site 6) et 20.4% (site 3). Un ratio < 0.4 correspond à seuil de stress pour les prairies (Roy et al., 2016). Dans notre article, la REW est utilisé comme un indicateur potentiel de manque d'eau, lorsque $REW < 0.4$.

2.4- Mesures de biomasse, qualité fourragère et composition botanique

Afin de s'affranchir de l'impact du pâturage ovin, des exclos ont été installés pour délimiter les zones de prélèvements. Avec 3 répétitions par niveau d'ensoleillement, la biomasse y est prélevée et coupée à 3-5 cm de haut sur une surface allant de 0.25 à 1m². Ce prélèvement se fait à l'aide d'une cisaille ou mini-tondeuse tous les 1 à 2 mois. Les échantillonnages de la végétation ont lieu au cours de la période de croissance des plantes, de mars à novembre. Pour les zones témoins, les suivis ont été réalisés sur des surfaces ayant des densités de végétation élevées (sol recouvert de plus de 95% de végétation), c'est à dire une densité de végétation similaire à celle observée dans des prairies. Pour les zones inter-rangs et panneaux, les surfaces ont été choisies de manière aléatoire. Suite au prélèvement, la biomasse est séchée en étuve (48 h, 65°C), et pesée. Le fourrage est ensuite broyé à 1 mm et placé dans un spectromètre proche infrarouge (NIRS, Foss6500). Cette méthode est basée sur l'analyse des spectres de réflectance pour avoir un aperçu de la qualité du fourrage. Environ 30% des échantillons ont été analysé chimiquement pour valider les équations de calibration du NIRS. Afin de mesurer la teneur en azote contenue dans le fourrage, la méthode Dumas a été utilisée. L'indice de nutrition azoté (INN, %) a été calculé pour les zones témoins afin de caractériser le niveau de fertilité des sites (Lemaire et Salette, 1984). Pour les parcs 4 à 6, la composition floristique (5 relevés réalisés sur 2 ans) a permis de calculer les pourcentages de présence des groupes suivants : graminées, légumineuses et autres dicotylédones.

2.5- Analyse de données et statistiques

Nous avons fait le choix de regrouper les données de certains mois afin de les analyser par saison : le printemps, en regroupant les mois de mars à mai, l'été avec les mois de juin à août, et enfin l'automne, regroupant les mois de septembre à novembre. La comparaison des effets des panneaux a été évaluée par analyse de la variance (ANOVA) lorsque les variables répondaient à l'hypothèse de normalité et que le nombre d'échantillons était suffisant. Dans les cas où ces critères n'étaient pas remplis, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé. Les données ont été analysées avec le logiciel RStudio®.

3. Résultats

3.1- Effets des panneaux sur le microclimat aérien et souterrain de la prairie

Au cours de l'année sur la majorité des parcs étudiés, le pourcentage d'ombrage mesuré sous panneaux est plus stable entre saison que celui mesuré dans l'inter-rangée (Tableau 3). De manière générale, le pourcentage d'ombrage annuel sous panneaux pour les parcs à panneaux fixes (parcs 1 à 5) est compris entre 82 et 94%, tandis que pour celui à panneaux mobiles (parc 6), il est de 75%. Le parc 1 se distingue néanmoins en présentant une plus importante variabilité de l'ombrage en zone sous panneaux. En inter-rangée, le pourcentage d'ombrage calculé est plus hétérogène (entre 6 et

36 %) entre les parcs et varie plus selon les saisons. Seul le parc 6 à panneaux mobiles présente un pourcentage d'ombrage plus stable.

La figure 2a met en évidence que sur l'ensemble des parcs étudiés, la température du sol est plus faible (valeurs négatives) en inter-rang que dans la zone témoin tout au long de l'année. Le parc 3 est celui qui a le moins de différences avec le témoin, c'est également celui qui a l'inter-rang le plus large. De même, la figure 2b montre une température du sol plus faible sous panneaux, avec cette fois un effet saisonnier marqué : c'est en été qu'il y a le plus grand écart de température avec la zone témoin (2 à 5°C). Tandis qu'en hiver la tendance s'inverse et certains parcs vont présenter des températures légèrement plus élevées sous les panneaux (parcs 2, 3 et 6).

Tableau 3 : Pourcentage d'ombrage (perte de rayonnement : PAR) dans l'inter-rang (I) et sous panneaux (P) pour chacun des parcs : moyenne $\pm$ SE (erreur standard), pour toutes les mesures (plusieurs années et 3 saisons : printemps, été, automne).

Table 3: Percentage of shade (radiation loss: PAR) in the inter-row (I) and under panels (P) for each park: mean $\pm$ SE, for all measurements (several years and 3 seasons: spring, summer, autumn).

Parcs	% ombrage I	% ombrage P
1	11 $\pm$ 4	82 $\pm$ 7
2	28 $\pm$ 33	93 $\pm$ 2
3	6 $\pm$ 7	92 $\pm$ 1
4	36 $\pm$ 10	94 $\pm$ 1
5	35 $\pm$ 13	93 $\pm$ 0.5
6	30 $\pm$ 2	75 $\pm$ 3

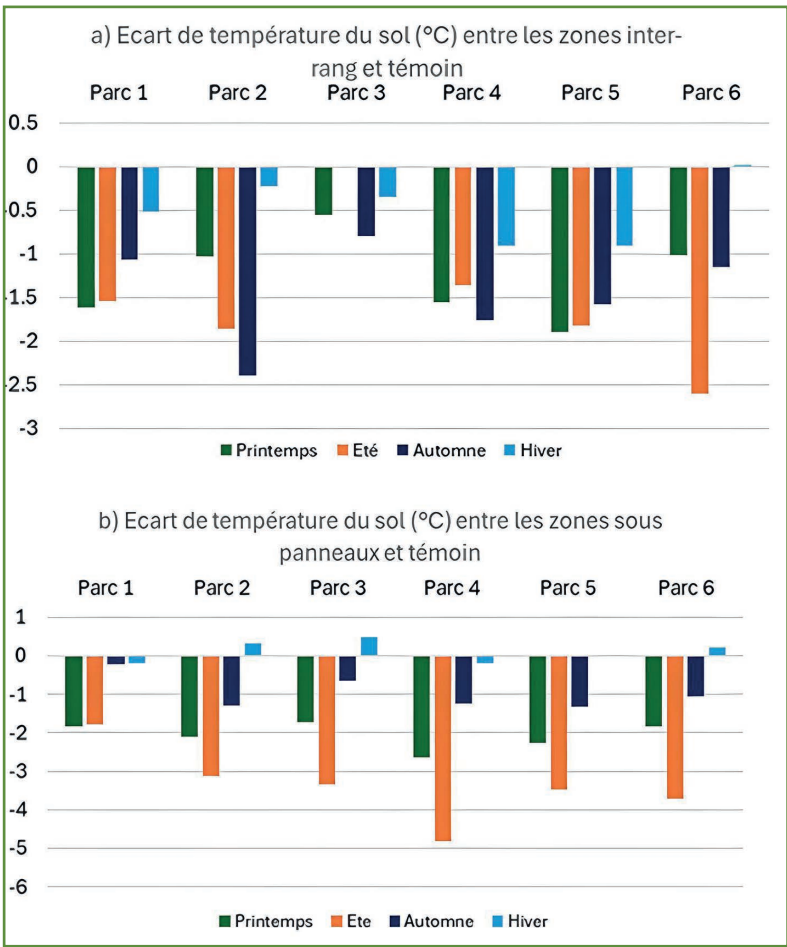


Figure 2 : Ecart de température du sol (°C, 20 cm de profondeur) entre la mesure réalisée dans l'inter-rang (2a) ou sous les panneaux (2b) et la mesure réalisée dans le témoin. Les écarts moyens par saison sont montrés (quelle que soit l'année). Une valeur négative correspond à une température plus faible en inter-rang ou sous panneaux qu'en zone témoin.

Figure 2: Soil temperature difference (°C, 20 cm depth) between the measurement taken in the inter-row (2a) or under the panels (2b) and the measurement taken in the control. Average differences per season are shown (regardless of year). A negative value corresponds to a lower temperature in the inter-row or panels than in the control zone.

La figure 3 montre la réserve en eau relative du sol (REW) pour chacun des sites, moyennée sur l'ensemble des mesures. C'est un indicateur de la disponibilité en eau dans le sol. Pour les parcs 2 et 4, la REW sous panneaux est inférieure au témoin et aussi inférieure à 0.4, soit un seuil potentiel de manque d'eau pour les plantes. Le parc 1 présente aussi une REW en dessous du seuil de 0.4 pour le témoin et sous panneaux. La REW de l'inter-rang est soit similaire à celle du témoin (parcs 2, 3 et 5), soit plus grande que celle du témoin (parcs 1 et 6) et quasi toujours supérieure à 0.4 sauf pour le parc 4. Seul le parc 6 (panneaux mobiles) présente une REW supérieure dans l'inter-rang et sous panneaux comparée au témoin.

3.2- Production de biomasse

La figure 4 montre que pour trois parcs sur six il y a un impact significatif de la présence des panneaux sur la production de biomasse. Sur les parcs 1 et 2 (panneaux fixes), il y a une diminution de la biomasse annuelle sous panneaux d'environ 50% tandis que sur le parc 6 (panneaux mobiles), c'est une augmentation de 52% qui a été mesurée. En inter-rang, la biomasse annuelle est similaire ($P > 0.05$) au témoin sur l'ensemble des parcs ayant des panneaux fixes et supérieure de 57% dans le parc 6 ayant des panneaux mobiles.

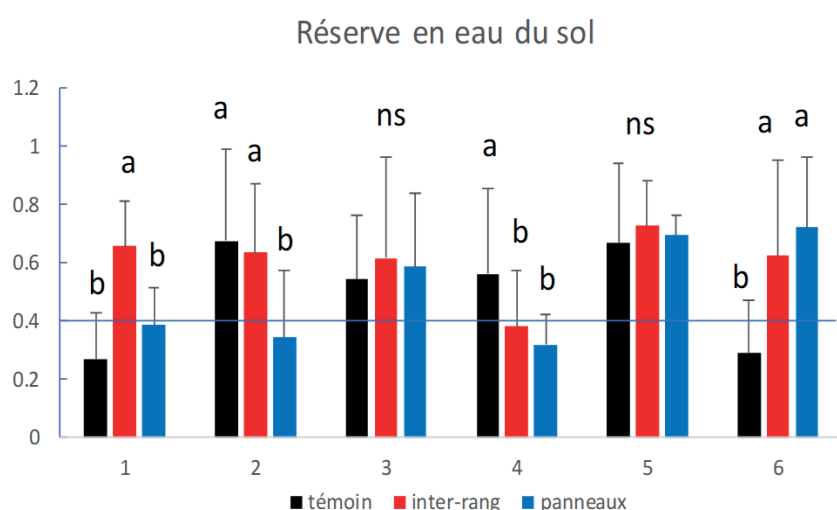


Figure 3 : Réserve en eau du sol (REW, à 20 cm de profondeur) mesurée dans le parc (témoin, inter-rang et panneaux). Moyenne $\pm$ écart-type (saisons et année). Par parc, des lettres différentes (a ou b) indiquent des différences statistiques significatives ($P \leq 0.05$) et ns : non significatif ($P > 0.05$). La barre horizontale correspond au seuil de 0.4 en deçà duquel l'eau du sol est limitante pour la croissance des plantes (Granier et al., 1999 ; Roy et al., 2016).

Figure 3: Soil water reserve (REW, at 20 cm depth) measured in the park (control, inter-row and panels). Mean $\pm$ standard deviation (seasons and year). For each plot, different letters (a or b) indicate statistically significant differences ($P \leq 0.05$) and ns: not significant ($P > 0.05$). The horizontal bar corresponds to the threshold of 0.4 below which soil water is limiting for plant growth (Granier et al., 1999; Roy et al., 2016).

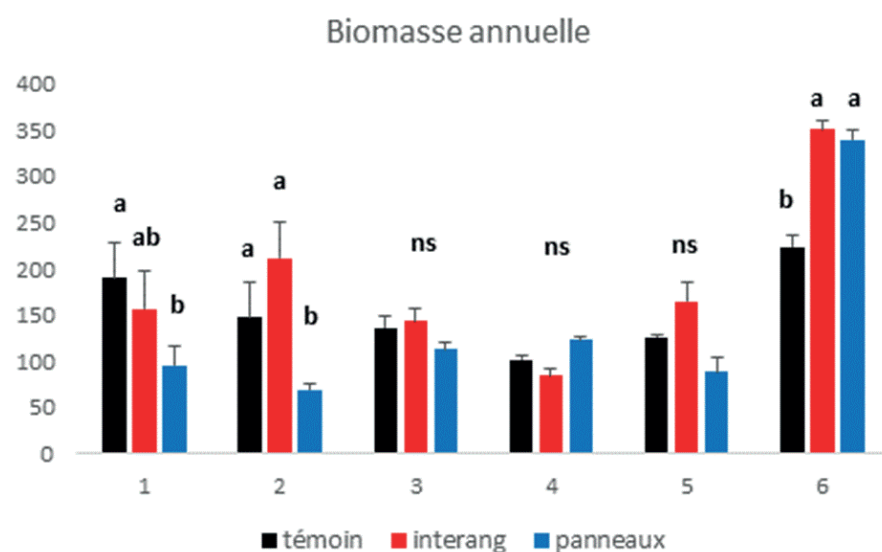


Figure 4 : Cumul annuel de la biomasse (g m^{-2}) moyennée sur deux ans, mesurée pour chaque parc en zones témoin, inter-rang et sous panneaux. Moyenne $\pm$ SE. Par parc, des lettres différentes indiquent des différences statistiques significatives ($P \leq 0.05$) et ns : non significatif ($P > 0.05$)

Figure 4: Annual cumulative biomass (g m^{-2}) averaged over two years, measured for each park in control, inter-row and under-panel zones. Mean $\pm$ SE. For each plot, different letters (a or b) indicate statistically significant differences ($P \leq 0.05$) and ns: not significant ($P > 0.05$).

Les moyennes saisonnières (tableau 4) des mesures de biomasse montrent un effet des panneaux majoritaire en été et en automne. Seul le parc 3 ne montre aucun effet des panneaux. Sur les parcs 2 et 5 (TOS > 59%), en été la biomasse mesurée en inter-rang a tendance à être favorisée. En revanche, sur les parcs avec un TOS supérieur à 50% (parcs 1, 2 et 5), la biomasse sous panneaux va plutôt être réduite. En automne, la biomasse en inter-rang est supérieure ou égale à celle du témoin, tandis que sous panneaux aucune tendance générale ne se dégage. Sur le parc 6 à panneaux mobiles, la biomasse en inter-rang et sous panneaux est supérieure à celle du témoin au printemps, été et automne.

Tableau 4 : Biomasse (g m⁻²) saisonnière, mesurée chaque année pour les six parcs, pour le témoin, inter-rang et panneaux (valeurs moyenne par traitement). Pour chaque ligne des lettres différentes indiquent des différences statistiques significatives (* : P ≤ 0.05; ** : P < 0.01; *** : P < 0.001; ns : P > 0.05). n = 3 à 6 selon les sites.

Table 4: Seasonal biomass (g m⁻²) measured each year for the six parks, for control, inter-row and panels (mean values per treatment). For each line, different letters indicate statistically significant differences (*: P ≤ 0.05; **: P < 0.01; ***: P < 0.001; ns: P > 0.05). n = 3 to 6 depending on site.

parc	année	saison	témoin	inter-rang	panneaux	significativité
1	2023	été	179.3	224.3	99.3	ns
1	2023	automne	64.9	48.4	54.0	ns
1	2024	printemps	25.8	11.5	24.3	ns
1	2024	été	107.3 a	42.7 b	33.2 b	*
1	2024	automne	69.6 a	22.9 ab	13.5 b	*
2	2023	été	105 b	235.9 a	71.7 b	*
2	2023	automne	25.1	60.5	28.6	ns
2	2024	printemps	19.6	16.7	12.6	ns
2	2024	été	162.3 ab	140.4 a	39.3 b	*
3	2023	été	85.7	99.6	64.8	ns
3	2023	automne	40.4	50.8	52.9	ns
3	2024	printemps	77.5	33.4	38.3	ns
3	2024	été	49.5	70.0	47.2	ns
3	2024	automne	39.8	67.0	44.2	ns
4	2021	été	33.8 b	24.4 c	47.3 a	**
4	2021	automne	21.2 ab	15.8 b	30.3 a	*
4	2022	printemps	38.2 b	34.5 b	77.2 a	**
4	2022	été	73.4 a	51.3 b	38.9 b	*
4	2023	printemps	49.7	40.8	37.1	ns
4	2023	été	71.9 b	56.7 b	105.1 a	*
4	2023	automne	17.1 b	28.8 a	33.7 a	*
5	2021	été	62.3	82.5	59.4	ns
5	2021	automne	17.1 b	31.2 a	20.8 b	*
5	2022	printemps	22.8	27.2	28.2	ns
5	2022	été	72.2 a	60.4 a	33.5 b	**
5	2023	printemps	17.1	15.1	19.3	ns
5	2023	été	158.9 b	213.4 a	68.1 c	***
5	2023	automne	28.3 b	63.8 a	37.8 b	***
6	2022	printemps	93.4 b	201.3 a	182.9 a	***
6	2022	été	59.9 b	105.3 a	80.5 ab	*
6	2022	automne	25.8 b	35.2 a	27.3 b	*
6	2023	printemps	143.6	137.0	154.3	ns
6	2023	été	104.9 b	178.7 a	179 a	**
6	2023	automne	19.8 b	44.9 a	54.5 a	***

3.4- Qualité du fourrage : analyse de l'azote total et indice de nutrition azoté (INN)

L'étude qualitative du fourrage n'a pas permis de mettre en évidence une corrélation entre le pourcentage de fibres totales (NDF) et le niveau de rayonnement. Nous ne présentons donc ici que les résultats pour l'azote total. La teneur azote total mesurée en zone témoin et en inter-rang est significativement plus faible que sous panneaux, et ce, dans la totalité des parcs photovoltaïques. Le cinquième parc présente lui des différences significatives entre chacun des niveaux de rayonnement.

L'INN des témoins sur les différents parcs est en moyenne de 0.29 ± 0.11 , ce qui indique un faible niveau de fertilité des sols des parcs. Pour 4 parcs (1, 2, 3, 4), l'INN est inférieur à 0.3. Les parcs 5 et 6 (anciennes prairie et friche) ont un INN de 0.38 et 0.45, respectivement.

3.5- Composition floristique de la prairie sur 3 parcs

Pour 3 parcs sur 6, des relevés botaniques ont été réalisés (Figure 6). Les parcs sont dominés par les graminées et les légumineuses

sont globalement peu présentes. En réponse à l'ombrage, la zone sous panneaux voit le pourcentage de graminées augmenter pour les 3 sites au détriment des dicotylédones (effet très marqué sur les parcs 4 et 6). Les légumineuses ne se maintiennent pas sous les panneaux fixes, par contre sur le parc ayant des panneaux mobiles (parc 6), celles-ci persistent. En zone inter-rang, on observe les mêmes variations de communautés végétales pour 2 parcs sur 3. Pour le parc 5, la proportion de graminées diminue légèrement en inter-rang par rapport au témoin, au profit des diverses.

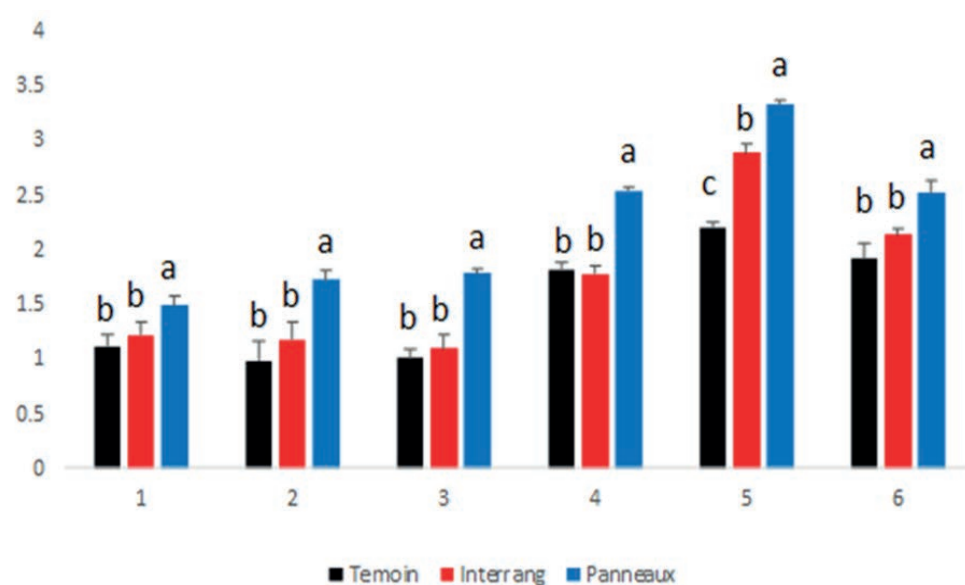


Figure 5 : Azote total (%) mesuré pour chaque parc en zones témoin, inter-rang et sous panneaux. Moyenne $\pm$ SE. Par parc, des lettres différentes indiquent des différences statistiques significatives ($P \leq 0.05$) et ns : non significatif ($P > 0.05$). $n = 3$ à 6 selon les sites.

Figure 5: Total nitrogen (%) measured for each park in control, inter-row and under-panel zones. Mean $\pm$ SE. For each plot, different letters (a or b) indicate statistically significant differences ($P \leq 0.05$) and ns: not significant ($P > 0.05$). $n = 3$ to 6 depending on site.

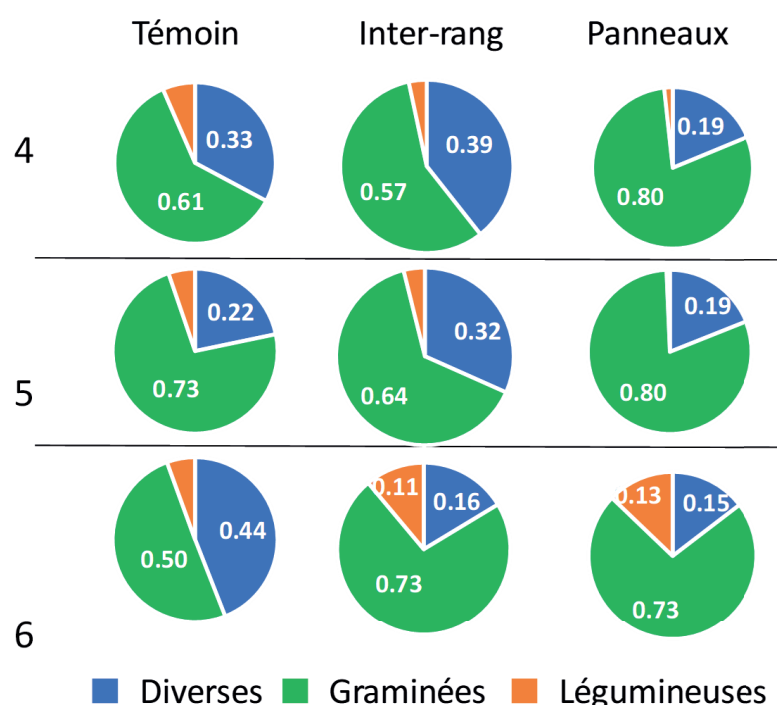


Figure 6 : Pourcentages de graminées, légumineuses et dicotylédones non fixatrices d'azote mesurés pour 3 parcs (4, 5, 6) en zones témoin, inter-rang et sous panneaux.

Figure 6: Percentages of grasses, legumes and forbs measured at 3 parks (4, 5, 6) in control, inter-row and under-panel zones.

4. Discussion

Nos travaux menés sur six parcs localisés dans différents pédoclimats en France et gérés par du pâturage ovin sur des prairies peu productives, confirment l'étude bibliographique introductive sur la variabilité de réponse du microclimat et par conséquent de la réponse de la prairie face à la présence de panneaux solaires. Sur les parcs étudiés, cette variabilité a été observée, avec notamment une réserve en eau du sol différente (facteur dépendant des propriétés des sols) en fonction des parcs et une production fourragère hétérogène intra et inter-parcs. Cela pouvant être lié à la perturbation de certaines zones lors de la construction des parcs, leur âge ou même par la présence des ovins (tassements du sol) (Drewry, 2006). Les changements de composition botanique observés entre les traitements pourraient aussi être à l'origine de la variabilité de réponse des prairies à la présence des panneaux solaires. En revanche, la réponse de la valeur nutritive (taux d'azote/protéines) est similaire entre les parcs et corrèlent bien avec d'autres observations bibliographiques (Armstrong *et al.*, 2016 ; Andrew *et al.*, 2021 ; Sturchio *et al.*, 2024).

4.1- Le microclimat

La présence des panneaux photovoltaïques a un effet direct sur le rayonnement par effet parasol. Malgré des différences de dimensionnement des structures, les parcs 2, 3, 4 et 5 présentent un fort taux d'ombrage sous panneaux supérieur à 82% (tableau 1), ce qui a déjà été observé dans d'autres parcs ayant des infrastructures similaires (Armstrong *et al.*, 2016 ; Adeh *et al.*, 2018). Le taux d'ombrage en inter-rang présente lui une variabilité plus importante, dû aux différences de largeur de l'inter-rang, et de la hauteur du point haut des panneaux. Le site 1 présente des taux d'ombrage plus faibles que les autres sites. Cet écart pourrait provenir de la présence d'interstices entre les panneaux plus importants que pour les autres sites permettant le passage d'un peu plus de lumière sous les panneaux solaires. Le site 6 en panneaux mobiles, présente-lui un taux d'ombrage plus faible et beaucoup plus stable tout au long de l'année, du fait de l'homogénéisation du rayonnement incident permise par la mobilité des panneaux.

Ces modifications du rayonnement entraînent par cascade des modifications des paramètres abiotiques du système, tels que la température du sol. Sous panneaux, les six sites tendent vers une réponse commune de refroidissement du sol. En inter-rang, l'intensité de cet écart varie en fonction des saisons, sans pouvoir déterminer si une saison se distingue en particulier des autres. On remarque tout de même que le parc 3 est celui qui présente le moins d'écart avec le témoin. Or, c'est également ce parc avec l'inter-rang le plus large, et le taux d'ombrage le plus faible. On observe donc une corrélation entre température du sol et taux d'ombrage, constat confirmé par de nombreuses études, telles que celle d'Andrew *et al.* (2024) et Armstrong *et al.* (2016).

4.2- La biomasse (quantité et qualité)

La production annuelle de biomasse des communautés végétales présentes sur les 6 parcs est globalement assez faible ($< 400 \text{ g m}^{-2}$), indiquant un faible potentiel fourrager des sites. Ce potentiel fourrager dépend de la disponibilité en ressources qui peuvent être essentiellement modulées par le pédoclimat, la composition botanique de la prairie et les pratiques agricoles (fertilisation, fauche, pâturage). Pour le témoin qui n'est pas limité en lumière, les faibles disponibilités en azote du sol (via l'INN comme proxy) mesurées sur l'ensemble des parcs, ainsi que la faible disponibilité en eau pour certains parcs pourraient expliquer ce faible potentiel fourrager. L'historique des sites est également un facteur explicatif, les panneaux ayant été implantés sur des parcelles non agricoles à faible potentiel agronomique, excepté pour le parc 5 sur lequel préexistait une prairie.

Bien que ces différentes structures ne modifient pas de la même manière le rayonnement, les travaux menés en situation agrivoltaïque, en agroforesterie ou avec des toiles ombrières ont aussi mis en évidence des effets variables sur la production fourragère (Weselek *et al.*, 2021 ; Laub *et al.*, 2022). De plus, il a été montré que plusieurs cultures peuvent adapter leur morphologie ou leur physiologie, ce qui entraîne des pertes de rendement faibles ou nulles (Arenas-Corraliza *et al.*, 2019), ce qui est le cas des graminées prairiales (Pang *et al.*, 2019 ; Madej *et al.*, 2024 ; Rainon et Dagouneau, 2022). Le rôle de la lumière diffuse (qualité de la lumière), dominante sous les panneaux, devra être évalué dans de futures travaux.

Dans notre étude, tous les parcs n'ont pas répondu de la même manière : une baisse significative de la biomasse sous panneau observée sur 2 des 6 sites (parcs 1 et 2), aucun effet pour 3 parcs (3, 4, 5) et une augmentation sur 1 parc (6) qui a des panneaux mobiles. Pour ce dernier site, le % d'ombrage était de 75% contre plus de 90% pour 4 parcs (2, 3, 4, 5). Pour le parc 6, le gain de biomasse a été substantiel malgré un ombrage important (75%). Peu d'études ont montré un effet positif de l'ombre induite par la présence des panneaux solaires sur la production de biomasse prairiale. Ceci a été observé en conditions estivales sur un parc similaire à ceux de notre étude (Adeh *et al.* 2018) et pour lequel la sécheresse estivale a eu un effet marqué sur le témoin en zone ensoleillée. Ceci confirme nos observations en été, mais uniquement certaines années et pas pour tous les parcs (tableau 4), ce qui rend difficile la généralisation d'un effet protecteur des panneaux en période estivale. Dans une méta-analyse, Laub *et al.* (2022) ont mis en évidence pour les plantes fourragères qu'une réduction de rayonnement de 40% avait peu d'effet sur la biomasse tandis qu'à 60%, la biomasse était significativement plus faible. Dans notre étude nous montrons qu'au-delà de 50% de TOS (mais avec un taux d'ombrage $> 82\%$), la biomasse est réduite, mais en deçà elle peut être maintenue. Dans l'inter-rang, l'ombrage a varié entre 6 et 36%. Nos résultats observés dans l'inter-rang sont cohérents avec les résultats obtenus dans cette méta-analyse sur

le facteur lumière : la biomasse fourragère n'a pas été réduite pour tous les parcs, confirmant qu'une baisse modérée de l'intensité lumineuse (en inter-rang) permet de maintenir, voire d'augmenter, la biomasse prairiale en conditions agrivoltaïques. Nos résultats montrent que d'autres facteurs, comme la disponibilité en eau et en azote du sol, pourraient expliquer les réponses différentielles entre nos parcs. Les travaux de Ludwig *et al.* (2001) ont mis en avant que la réduction de la lumière peut limiter la croissance des graminées pendant la saison des pluies, lorsque l'eau et les nutriments sont abondants. Cependant, pendant la saison sèche, lorsque l'eau est rare, l'ombrage a eu un effet positif sur la production végétale, probablement en réduisant le stress hydrique. Pour les parcs 1 et 2, pour lesquels une réduction significative de biomasse est observée sous panneaux, l'hypothèse avancée par ces auteurs n'est vérifiée que pour le parc 2 puisque la REW sous panneaux est inférieure à 0.4 (conditions hydriques limitantes) et l'INN du témoin est faible (< 0.3). La REW du témoin (inférieure à 0.4) du parc 1 n'est pas cohérente avec la réponse de la biomasse, à l'inverse une REW plus élevée en inter-rang et sous panneaux comparée au témoin (parc 6) pourrait expliquer la baisse de biomasse du témoin. Un autre facteur à prendre en compte est le ruissellement de l'eau de pluie dans l'inter-rang mais aussi sous panneaux, non mesuré, pourrait expliquer les différences de réponse entre les parcs.

La modification de la composition botanique, observée dès la deuxième année (parc 4) après implantation, pourrait expliquer les différences de réponse entre communautés végétales présentes sous panneaux comparé au témoin (Madej *et al.*, 2024). L'hypothèse de Ludwig *et al.* (2001) n'a pas été non plus vérifiée pour le parc 6, puisque l'augmentation de biomasse observée sous panneaux a été observée pour un sol plus fertile (INN = 0.38) et une réserve en eau non limitante (REW > 0.7) comparé aux autres parcs. De plus sur ce parc, les graminées sous panneaux dominent la communauté végétale (73%) comparé au témoin. Celles-ci étant, en général plus productives et moins sensibles à l'ombrage que des dicotylédones non fixatrices. Ainsi les changements de composition botanique ont probablement un effet important sur la réponse de la biomasse des prairies à l'ombrage, en conditions non limitantes en eau et en azote. Ceci a pour conséquence de comparer des traitements ayant des biomasses produites par des espèces différentes. Par exemple pour le parc 4, la zone témoin est dominée par une graminée à faible potentiel de production prairiale (*Vulpia bromoides*) tandis que sous panneaux, la communauté est dominée par une graminée plus productive (*Dactylis glomerata*). De plus, les graminées sembleraient mieux valoriser le rayonnement diffus (Healey *et al.*, 1998), qui est dominant sous les panneaux comparés aux zones ensoleillées.

La production de biomasse des prairies présente des forts contrastes saisonniers. En situations agrivoltaïques, d'autres travaux ont montré qu'en fonction des conditions climatiques générales du lieu, les cultures peuvent bénéficier de l'ombrage dans les zones chaudes et sèches (Adeh *et al.* 2018 ; Barron-Gafford *et al.*, 2019). Nous avons analysé la réponse de la biomasse au cours de plusieurs saisons et années permettant de couvrir des situations

climatiques ambiantes variées pour les 6 parcs. Pour les parcs 1, 2 et 5, la biomasse a diminué sous les panneaux principalement en été, tandis que la biomasse des parcs 4 et 6 a augmenté sous les panneaux sur plusieurs saisons (printemps, été, automne, Tableau 4). Les disponibilités en eau (parcs 2 et 4) ou en lumière (parcs 1, 5) pourraient expliquer ces réponses, d'autant plus que ces trois parcs ont un taux de couverture élevé (supérieur à 47%). Le témoin (parcs 4, 5 et 6) a eu une réduction de biomasse liée au stress hydrique, tandis que sous panneaux il y a une réduction du stress, qui en plus de réduire l'intensité lumineuse, réduit la température de l'air, la vitesse du vent, l'ETP ce qui améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau des plantes.

Dans cette analyse de la réponse de la biomasse sous les panneaux, il faut considérer le témoin situé en zone ensoleillée, pour lequel d'autres facteurs que le rayonnement ou la composition botanique, tels que le chantier de construction du parc (tassement du sol, perturbations du milieu), ont pu influencer sur son niveau de production. Il serait, à l'avenir, nécessaire de comparer les performances du témoin sur le parc et dans une prairie à proximité ayant une composition botanique et des pratiques de gestions similaires.

La qualité du fourrage, évaluée par la teneur en azote total, a été nettement augmentée sous panneaux, bien que les légumineuses soient peu présentes sous les panneaux (observé sur les parcs 4, 5 et 6). Cet effet a déjà été observé dans la littérature sur un grand nombre d'espèces. Plusieurs hypothèses ont été avancées : augmentation de la disponibilité en eau et en azote dans le sol, plasticité physiologique pour absorber plus de lumière par les feuilles (chlorophylle), décalage phénologique des plantes sous panneaux comparé au témoin (dominance du stade végétatif), accumulation d'azote dans des cellules plus petites qu'en pleine lumière (par ex. Kephart et Buxton, 1993).

Conclusion

Les différents parcs photovoltaïques étudiés présentaient des environnements lumineux hétérogènes caractérisés par des zones sous panneaux particulièrement ombragées et des zones inter-rangs plus lumineuses. De la même manière, nous avons observé sur l'ensemble des parcs une variabilité inter-sites et aussi intra-annuelle de la production de biomasse, comme précédemment observée dans la littérature. Malgré cette variabilité des résultats, les parcs ayant des taux de couverture les plus faibles ($< 50\%$) sont ceux qui ont eu un maintien de production de biomasse sous les panneaux et inter-rang voire une augmentation pour le parc ayant des panneaux mobiles. Par ailleurs, un ensemble d'autres facteurs peuvent expliquer les modifications du fourrage observées sur tous les sites. Celles-ci semblent être liées à la fois à des changements physiologiques (plasticité) et morphologiques (stade végétatif prolongé sous panneaux) et à des modifications de composition botanique (données disponibles que sur la moitié des parcs).

Dans le futur, il serait pertinent de mesurer la lumière diffuse, la composition botanique ainsi que le stade phénologique des plantes (végétatif, reproducteur), qui sont des déterminants importants du potentiel de production des prairies.

Au regard de ces impacts, les parcs agrivoltaïques en situation d'élevage semblent offrir aux animaux des zones de prospection plus diversifiées en espèces végétales quantitativement et qualitativement qu'en situation d'élevage conventionnel sans ombre persistante dans les prairies. Certaines publications associent par exemple la plus riche production fourragère sous panneaux à une prise de poids des animaux ou encore identifient des effets protecteurs des panneaux lorsque l'animal est soumis à des conditions environnementales extrêmes (Rainon et Dagouneau, 2022). Bien que les études présentées dans cet article n'aient pas directement étudié l'impact des panneaux sur les systèmes d'élevage, productions fourragères et animales demeurent intimement liées. Il semble donc essentiel de poursuivre les initiatives expérimentales combinant ces deux approches. En outre, les éléments décrits dans cet article semblent désigner la prairie peu productive comme une candidate potentielle à l'agrivoltaïsme. Un élargissement des connaissances à des systèmes prairiaux plus productifs permettrait d'évaluer si les réponses d'autres types de prairies sont des potentiels candidats à l'agrivoltaïsme. Des efforts considérables de recherche sont à déployer de manière à caractériser finement les combinaisons de conditions pédoclimatiques, modalités technologiques des panneaux et pratiques culturelles offrant les meilleures performances agroécologiques aux prairies.

Remerciements

Les études menées sur les sites 1 et 2 ont été financées par Plan France Relance ainsi qu'un partenariat de recherche entre INRAE et Baywa r.e. France. AS remercie Cécile Augrain, Jérôme Dumont ainsi que les équipes agronomies et maintenance du groupe Baywa r.e. France pour leur contribution dans la mise en place et la maintenance du matériel et l'analyse des données.

L'étude menée sur le parc 3 a également été financée par le Plan France Relance et Valorem dans le cadre d'un accord de collaboration entre cette entreprise et l'INRAE. MG remercie Thomas Di Franco pour son support dans la mise en place de l'expérimentation, et l'équipe P3F de Lusignan pour son support technique.

Les études menées sur les sites 4, 5 et 6 ont été financées par un partenariat de recherche entre INRAE UREP et JPEE (site 4) et Photosol (sites 5 et 6). CPC, NB et SP remercient Perrine Brassier, David Colosse, Loan Madej, Luc Michaud et Marilyn Roncoroni de l'UREP pour leur contribution dans l'acquisition, les suivis terrain et l'analyse de certaines données.

Références bibliographiques

- Andrew A.C., Higgins C.W., Smallman M.A., Graham M., et Ates S. (2021). Herbage yield, lamb growth and foraging behavior in agrivoltaic production system. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, p. 1-12. DOI: 10.3389/fsufs.2021.659175.
- Andrew A.C., Higgins C.W., Smallman M.A., Prado-Tarango D.E., Rosati A., Ghajar S., Graham M., et Ates S. (2024). Herbage and sheep production from simple, diverse, and legume pastures established in an agrivoltaic production system. *Grass and Forage Science*, 79, p. 294-307. DOI: 10.1111/gfs.12653.
- Arenas-Corraliza, M.G., Rolo, V., López-Díaz, M.L. et al. (2019). Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions. *Sci Rep* 9, 9547. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46027-9>.
- Armstrong A., Ostle N.J., et Whitaker J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11 (7), p. 1-11. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- Barron-Gafford GA, Pavao-Zuckerman MA, Minor RL, Sutter LF, Barnett-Moreno I, Blackett DT, Thompson M, Dimond K, Gerlak AK, Nabhan GP, Macknick JE. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nat Sustain* 2:848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- Bruhwyler R., Sánchez H., Meza C., Lebeau F., Brunet P., Dabadie G., Dittmann S., Gottschalg R., et Negroni J.J. (2023). Vertical agrivoltaics and its potential for electricity production and agricultural water demand: a case study in the area of Chanco, Chile. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, p. 1-9. DOI: 10.1016/j.seta.2023.103425.
- Cruz, P. (1997). Effect of shade on the growth and mineral nutrition of a C4 perennial grass under field conditions. *Plant and Soil* 188, 227–237. <https://doi.org/10.1023/A:1004296622463>.
- Deiss, V. (2023). Rapport d'étude sur le bien-être animal – Centrale solaire de CVE à Bissey-sous-Cruchaud.
- Dodd, M. B., McGowan, A. W., Power, I. L., and Thorrold, B. S. (2005). Effects of variation in shade level, shade duration and light quality on perennial pastures. *NZ. J. Agric. Res.* 48, 531–543. DOI: 10.1080/00288233.2005.9513686.
- Drewry, J. J. (2006). Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 114, 159–169. DOI: 10.1016/j.agee.2005.11.028.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., et Ferard Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36 (10), p. 2725-2732. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- Edmond, D. B. (1964). Some effects of sheep treading on the growth of 10 pasture species. *NZ. J. Agric. Res.* 7, 1–16. DOI: 10.1080/00288233.1964.10419994.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling*, 116, 269-283.
- Graham M., Ates S., Melathopoulos A.P., Moldenke A.R., DeBano S.J., Best L.R., et Higgins C.W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 11 (1), p. 1-13. DOI: 10.1038/s41598-021-86756-4.
- GIEC. Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. (2022). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/technical-summary/>.
- Hassanpour Adeb E., Selker J.S., et Higgins C.W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency.

- PloS One, 13 (11), p. 1-15. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256. Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling*, 116, 269-283.
- Graham M., Ates S., Melathopoulos A.P., Moldenke A.R., DeBano S.J., Best L.R., et Higgins C.W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 11 (1), p. 1-13. DOI: 10.1038/s41598-021-86756-4.
- GIEC. Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. (2022). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/technical-summary/>.
- Hassanpour Adeb E., Selker J.S., et Higgins C.W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PloS One*, 13 (11), p. 1-15. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.
- Healey, K. D., G. L. Hammer, K. G. Rickert, et M. P. Bange. Radiation Use Efficiency Increases When the Diffuse Component of Incident Radiation Is Enhanced under Shade. *Australian Journal of Agricultural Research* 49, n° 4 (1998): 665-72. <https://doi.org/10.1071/a97100>.
- Kannenber S.A., Sturchio M.A., Venturas M.D., et Knapp A.K. (2023). Grassland carbon-water cycling is minimally impacted by a photovoltaic array. *Communications Earth & Environment*, 4 (1), p. 1-8. DOI: 10.1038/s43247-023-00904-.
- Kampherbeek E.W., Webb L.E., Reynolds B.J., Sistla S.A., Horney M.R., Ripoll-Bosch R., Dubowsky J.P. and McFarlane Z.D. (2023) A preliminary investigation of the effect of solar panels and rotation frequency on the grazing behavior of sheep (*Ovis aries*) grazing dormant pasture. *Applied Animal Behaviour Science* 258, 105799. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105799>.
- Kephart KD et Buxton DR. (1993). Forage Quality Responses of C3 and C4 Perennial Grasses to Shade, *Crop Science*, 33, no. 4, <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300040040x>.
- Klyk, C., Schindele, S. & Dupraz, C. (2024) A Visionary Outlook on Agrivoltaics. in *Agrivoltaics: Technical, Ecological, Commercial and Legal Aspects* (eds Constantin Klyk & Stephan Schindele) pp 371-393 (IET Publisher). doi. https://doi.org/10.1049/PBPO245E_ch11
- Laub M, Pataczek L, Feuerbacher A, Zikeli S, Hög P. (2022). Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis. *Agron Sustain Dev* 42:13. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00783-7>.
- Lemaire G et Salette J. (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 4, 423-430.
- Ludwig, F, de Kroon, H, Prins, H.T, Berendse, F. (2001). Effects of nutrients and shade on tree-grass interactions in an East African savanna. *Journal of Vegetation Science* 12: 579-588. <https://doi.org/10.2307/3237009>.
- Madej L., Picon-Cochard C., l'Ecluse C.B. de, Cogny C., Michaud L., Roncoroni M., et Colosse D. (2024). One Year of Grassland Vegetation Dynamics in Two Sheep-Grazed Agrivoltaic Systems. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 1, p. 1-10. DOI: 10.52825/agripv.v1i.692.
- Marrou H., Guillioni L., Dufour L., Dupraz C., et Wery J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, p. 117-132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- Pang K., Van Sambeek J.W., Navarrete-Tindall N.E., Lin C.-H., Jose S., et Garrett H.E. (2019). Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. *Agroforestry Systems*, 93 (1), p. 11-24. DOI: 10.1007/s10457-017-0067-8.
- Rainon C., Dagouneau C. (2022). Pâturage des ovins sous panneaux photovoltaïques : Synthèse du suivi réalisé sur le site de Verneuil, dans la Nièvre, en 2021. *Fourrages* 251, 49-53.
- Roy J, Picon-Cochard C, Augusti A, Benot ML, Thierry L, Darsonville O, Landais D, Piel C, Defossez, M, Devidal S, Escape C, Ravel O, Fromin N, Volaire F, Milcu A, Bahn M, Soussana J-F. (2016). Elevated CO2 maintains grassland net carbon uptake under a future heat and drought extreme. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 6224-6229. DOI: 10.1073/pnas.1524527113.
- Sturchio M.A., Kannenberg S.A., et Knapp A.K. (2024). Agrivoltaic arrays can maintain semi-arid grassland productivity and extend the seasonality of forage quality. *Applied Energy*, 356, p. 1-7. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122418.
- Sturchio M.A., Macknick J.E., Barron-Gafford G.A., Chen A., Alderfer C., Condon K., Hajek O.L., Miller B., Pauletto B., Siggers J.A., Slette I.J., et Knapp A.K. (2022). Grassland productivity responds unexpectedly to dynamic light and soil water environments induced by photovoltaic arrays. *Ecosphere*, 13 (12), p. 1-7. DOI: 10.1002/ecs2.4334.
- Weselek A., Bauerle A., Hartung J., Zikeli S., Lewandowski I., et Högy P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41 (5), p. 1-15. DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.