

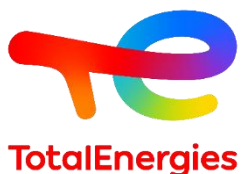
MEMOIRE EN REPONSE A L'AVIS MRAE N°2024APGE24

VERSION DEPOSEE LE 12/08/2024

Projet de parc agrivoltaïque « TESA » Commune de Ancerville (55)



(Grand Est – Meuse)



TotalEnergies Renouvelables France

Siège social

74 Rue Lieutenant de Montcabrier
Technoparc de Mazeran
34 536 Béziers

Agence Grand Est

18 rue Dom Perignon
Pole Technologique du Mont Bernard
51100 Châlons-En-Champagne

PREAMBULE

La société TotalEnergies Renouvelables France (filiale à 100% de la Compagnie TotalEnergies), acteur majeur de la production d'électricité d'origine renouvelable, développe un projet d'Agrivoltaïsme sur la commune d'Ancerville (Meuse 55). Le projet occupe une superficie d'environ 81 ha sur des terrains agricoles. L'objectif du projet est le développement, la construction et l'exploitation d'une centrale Agrivoltaïque produisant une électricité d'origine renouvelable. Le parc sera totalement démantelé à l'issue de son exploitation.

Un dossier de demande de permis de construire n° PC 055 010 23 0 0003 a été déposé en date du 16 mai 2023, avec l'ensemble des pièces requises par la réglementation en vigueur.

En application du décret n°2020-844 du 3 juillet 2020 relatif à l'autorité environnementale et à l'autorité en charge de l'examen au cas par cas modifiant l'article R.122-6 du code de l'environnement, l'autorité environnementale est, pour le projet Agrivoltaïque TESA à Ancerville (55) porté par la société TotalEnergies Renouvelables France, la Mission Régionale d'Autorité environnementale (MRAe) GRAND EST, de l'Inspection Générale de l'Environnement et du Développement Durable (IGEDD). Elle a été saisie pour avis par la Direction Départementale des Territoires De Meuse (55) le 18 Janvier 2024.

L'avis devra être porté à la connaissance du public par l'autorité en charge de le recueillir, dans les conditions fixées par l'article R. 122-7 du code de l'environnement, à savoir le joindre au dossier d'enquête publique ou le mettre à disposition du public dans les conditions fixées par l'article R. 122- 7 du code de l'environnement. L'article L. 122-1 du code de l'environnement fait obligation au porteur de projet d'apporter une réponse écrite à l'Autorité environnementale.

Cette réponse doit être mise à disposition du public, par voie électronique, au plus tard au moment de l'ouverture de l'enquête publique ou de la participation du public par voie électronique. La MRAe recommande que cette réponse soit jointe au dossier d'enquête ou de participation du public.

En réponse à cet avis, TotalEnergies Renouvelables France (TotalEnergies dans la suite du document) souhaite apporter par le présent document des éléments de réponse et d'informations complémentaires à la compréhension du dossier.

Ce document a été rédigé par TotalEnergies sur la base des éléments transmis par les bureaux d'études Atedev (pour les recommandations 9 à 11)

SOMMAIRE

MEMOIRE EN REPONSE A L'AVIS MRAE N°2024APGE24	1
VERSION DEPOSEE LE 12/08/2024.....	1
I. REPONSES RELATIVES AUX RECOMMANDATIONS DE L'AUTORITE ENVIRONNEMENTALE EMISES SUR LE PROJET ET L'ENVIRONNEMENT	4
RECOMMANDATION 1	4
RECOMMANDATION 2	5
RECOMMANDATION 3	7
RECOMMANDATION 4	12
RECOMMANDATION 5	15
RECOMMANDATION 6	19
RECOMMANDATION 7	20
II. REPONSES RELATIVES AUX RECOMMANDATIONS DE L'AUTORITE ENVIRONNEMENTALE EMISES SUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT PAR LE PROJET	22
II.A. LES MILIEUX NATURELS ET LA BIODIVERSITE	22
RECOMMANDATION 8	22
II.B. LE PAYSAGE ET LES CO-VISIBILITES	22
RECOMMANDATION 9	22
RECOMMANDATION 10	24
II.C. LA RESSOURCE EN EAU	24
RECOMMANDATION 11	24
II.D. LE RISQUE INCENDIE	25
RECOMMANDATION 12	25
II.D. LE DEMANTELEMENT ET REMISE EN ETAT DU SITE	25
RECOMMANDATION 13	25
III. ANNEXES	26
ANNEXE 1 –DYNAMIQUE VEGETALE SOUS L'INFLUENCE DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES SUR DEUX SITES PRAIRIAUX PATURES, MADEJ LOAN.....	26
ANNEXE 2 - RAPPORT D'ETUDE SUR LE BIEN-ETRE ANIMAL – CENTRALE SOLAIRE DE CVE A BISSEY-SOUS-CRUCHAUD (71)	27

I. REPONSES RELATIVES AUX RECOMMANDATIONS DE L'AUTORITE ENVIRONNEMENTALE EMISES SUR LE PROJET ET L'ENVIRONNEMENT

RECOMMANDATION 1

L'Ae observe que le dossier ne précise pas la situation administrative du site et recommande au pétitionnaire de préciser les responsabilités respectives des propriétaires des terrains et du pétitionnaire en matière de gestion, de surveillance et d'entretien du site, et lors du démantèlement des centrales en vue de sa remise en état.

REPONSE APPOREE

Les terrains sur lesquels le pétitionnaire souhaite implanter le projet Agrivoltaïque sont à vocation agricole. Lors de la phase d'exploitation, l'ensemble des responsabilités sont à la charge du pétitionnaire. Une surveillance afin de garantir le bon fonctionnement de la centrale agrivoltaïque sera mis en place par les équipes de maintenance du pétitionnaire. TotalEnergies entretien des éléments techniques du site (structures, panneaux solaire, onduleurs, bache a incendie, chemin d'accès, chemin d'exploitation, poste de livraisons et de transformation) Le démantèlement de la centrale est à la charge exclusive de TotalEnergies, à la fin du contrat liant le pétitionnaire avec le propriétaire, le pétitionnaire mettra tout en œuvre pour remettre en état le terrain comme à son arrivée ou céder la centrale au propriétaire du terrain.

Concernant le démantèlement de la centrale, à ce titre un rapport d'un expert foncier sera effectué avec un état initial et un état final a la fin du démantèlement. Ce rapport d'expertise foncière sera annexé au Bail, le pétitionnaire rappelle qu'il s'agit d'un projet Agrivoltaïque et que l'ensemble des éléments implanté sont entièrement réversibles.

L'ensemble des responsabilités ci-dessous sont à la charge du propriétaire et de l'exploitant agricole :

- Maîtriser le développement de la végétation par tout moyen qu'il jugera utile de mettre en œuvre
- Non détériorer les installations liées au parc photovoltaïque
- Signaler toute dégradation, ou tout dysfonctionnement qu'il pourrait constater sur les installations solaires (structures porteuses, panneaux photovoltaïques, câbles etc.)
- Entretien des éléments paysagées.
- Eviter toute concurrence ente la production agricole et la production énergétique.

RECOMMANDATION 2

L'Ae recommande au pétitionnaire de justifier ce choix d'aménagement au regard de son bilan environnemental et d'établir, en lien avec les services de l'État et la Chambre départementale d'Agriculture, un retour d'expérience à l'issue d'une première période d'exploitation de 3 ans sur le bon fonctionnement d'une production agricole, avec évaluation des éventuelles pertes de rendement et des impacts tenant compte des intrants utilisés, couplée à une production énergétique.

L'Ae s'est aussi interrogée, dans ce contexte, sur la logique du pétitionnaire qui présente un projet qu'il qualifie d'agrivoltaïque, alors que ce qualificatif n'est pas encore totalement défini au plan réglementaire et lui recommande, en l'état des textes actuels, de justifier ce qualificatif.

REPOSE APPOREE

Concernant la recommandation de l'AE sur le choix d'aménagement au regard du bilan environnemental, il est à noter qu'afin d'obtenir des données précises et fiables, les calculs de CO₂ économisé ainsi que l'équivalence de consommation électrique par foyer sont définis à partir des données de l'INSEE, ENEDIS, l'ADEME. Ces calculs prennent en compte :

- la fabrication des modules,
- le transport des modules,
- la fabrication des onduleurs,
- la fabrication des transformateurs,
- la fabrication et transport des supports,
- la fabrication des composants électriques,
- l'installation,
- la fin de vie des panneaux.

L'installation la centrale solaire Agrivoltaïque TESA permettra pendant sa durée de vie d'éviter la production de 280 490 tonnes de Co² par rapport au mix énergétique européen. Si on effectue le même calcul par rapport au mix énergétique français, la centrale permet d'éviter la production de 36 853 tonnes de Co².

A contrario, la fabrication de la centrale a aussi émis du carbone à hauteur de 24 778 tonnes, le temps de retour Energétique de la centrale comparée au mix européen est de 3.2 années et 16.1 années par rapport au mix énergétique français.

L'ensemble de ce site permettra une production équivalente à la consommation électrique (hors chauffage) de 15 287 habitants de la Meuse.

TotalEnergies prend en compte la recommandation de l'AE et est prêt à établir et à fournir un retour d'expérience à l'issue d'une première période d'exploitation de 3 ans en évaluant les éventuelles pertes de rendement et les impacts tenant compte des intrants utilisés, couplée à une production énergétique.

Enfin, concernant le qualificatif du projet, TotalEnergies rappelle que la loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables ou loi APER du 10 mars 2023 définit l'agrivoltaïsme comme : « une installation de



production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil et dont les modules sont situés sur une parcelle agricole où ils contribuent durablement à l'installation, au maintien ou au développement d'une production agricole. Art. L. 31436 »

La loi APER en son article n°2 encadre les obligations d'une installation agrivoltaïque avec plusieurs principes, une centrale peut être décrite comme agrivoltaïque si elle rend au moins un des services décrits par la suite à la parcelle agricole : l'amélioration du potentiel et de l'impact agronomique, l'adaptation au changement climatique, la protection contre les aléas¹ ou l'amélioration du bien-être animale².

Concernant la durabilité du projet il est essentiel de préciser que les deux exploitants agricoles du projet sont en pleine carrières, ce point est détaillé dans la partie « 4 Exploitants liées au Projets » page 12 et 13 de l'étude préalable Agricole réalisée par la chambre d'agriculture de la Meuse.

Au-delà de la durabilité projet agrivoltaïque doit aussi être réversible, sur ce projet ce point est détaillé dans la partie « 1.5. Fin de vie de la centrale photovoltaïque », page 119 de l'étude d'impact, des installations sont en pieux battues ou vissées, les locaux techniques sont positionnés sur lit de sable.

Le projet Agrivoltaïque TESA d'Ancerville ne change en aucun cas la destination du bien, ou le type de production des parcelles agricole. Sur l'ensemble du site d'une superficie de 81,5 ha l'implantation des structures agrivoltaïque représenteront 6,58 ha soit 8.08 % d'emprise globale sur le foncier agricole. Du fait de sa faible emprise au sol la technologie Bifaciale verticale présente sur 77 ha, n'entrave pas l'exploitation agricole de la centrale. Ce point est détaillé dans la partie « 7.1 Mesure d'évitement et de réduction, impacts résiduels après mesure » page 41 de l'étude préalable Agricole réalisée par la chambre d'agriculture de la Meuse.

Dans ce projet, TotalEnergie a fait le choix de créer une synergie entre la production agricole et la production énergétique. L'ensemble du projet s'est construit en collaboration entre les exploitants agricoles et TotalEnergies afin que sur l'ensemble du parc, la production agricole (cultures de céréales et d'oléagineux) reste l'objectif premier.

¹ Annexe 1 : [MADEJ Loan 2020 Dynamique végétale.pdf](#)

² Annexe 2 : COM-rapport-etude-bien-etre-animal-INRAE-CVE-STATKRFAT-v2.pdf

RECOMMANDATION 3

L'Ae recommande au pétitionnaire de :

- **détailler pour le choix du site, son périmètre de recherche de surfaces artificialisées en friches, pour installer son projet de centrale photovoltaïque, dans l'esprit de la règle n°5 du SRADDET d'implantation prioritaire sur des sites dégradés, et non au détriment des fonctions écosystémiques des espaces forestiers, naturels et agricoles ;**
- **puis analyser et comparer les différents sites possibles, en application de l'article R.122-5 II 7° du code de l'environnement, sur la base d'une comparaison multi-critères permettant de démontrer que le site retenu est celui de moindre impact environnemental et agricole.**

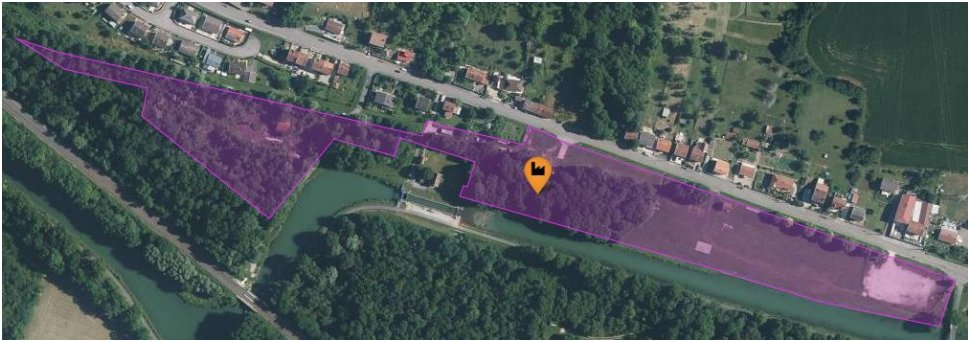
REPOSE APPOREE

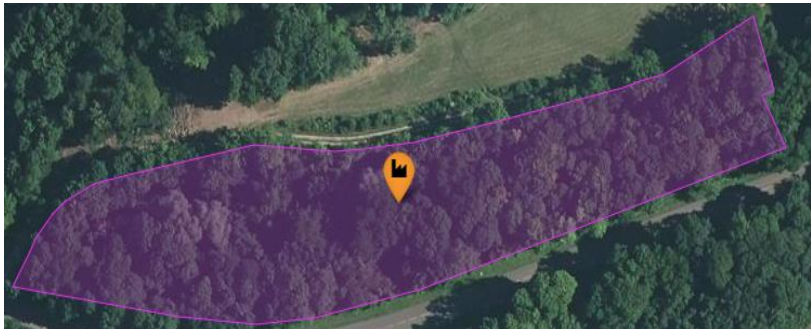
Selon l'outil « Cartofriches » mis en ligne par le CEREMA pour faciliter l'identification des friches, il existe 6 friches référencées se situant dans un rayon de 10 km à proximité du poste source de Marnaval. Ces friches sont des surfaces boisées ou artificialisées.


Aucune de ces friches, potentielles ou avérées, ne se situe en zone agricole. Par conséquent, l'implantation d'un projet de centrale agrivoltaïque est incompatible en l'état actuel. Par ailleurs, ce type de projet solaire éligible au cas 3 aurait nécessité une modification des zonages inscrits dans le document d'urbanisme de la commune ainsi qu'un **défrichement**.

Afin d'apporter une réponse à la recommandation de l'autorité environnementale et conformément à la règle 5 du SRADDET, voici la liste commentée de friches se situant dans un rayon de 10 km à proximité du poste source de Marnaval.


Commune d'Ancerville :

Friche sans projet (Aperam)
Surface de 3.6 ha

<p>Figure 1 : Localisation de la friches Aperam référencées sur la commune d'Ancerville (55) (source : Cartofriches)</p> <p>Le site se situe dans un secteur pavillonnaire et est en partie boisé. La surface trop petite pour y développer un projet en plus du boisement important qui nécessite un défrichage. En outre, la zone dans laquelle se situe cette friche est inondable et une démolition est nécessaire. Elle fait également partie des zones naturelles selon le document d'urbanisme de la commune</p>

Friche sans projet (Le Pré Réaux)
Surface de 1.1 ha

<p>Figure 2 : Localisation de la friche le pré Réaux référencées sur la commune d'Ancerville (55) (source : Cartofriches)</p> <p>La friche est boisée sur son entièreté et la surface est trop petite pour y développer un projet, par ailleurs, la zone dans laquelle se situe la friche est inondable. Elle fait également partie des zones naturelles selon le document d'urbanisme de la commune.</p>

Friche avec projet (Amref – Marnaval)
Surface de 13.8 ha

<p><i>Figure 3 : Localisation de la friches Amref – Marnaval référencées sur la commune d'Ancerville (55) (source : Cartofriches)</i></p>
<p>Le site indiqué en « friches avec projet » et situé à l'ouest de la commune est une zone naturelle d'environ 13 ha. Un projet est en cours de développement dessus. TotalEnergies a essayé de sécuriser le foncier pour développer un projet photovoltaïque sur ce site. Cependant L'Etablissement Public Foncier de Grand Est (EPFGE) a acquis le foncier. Par ailleurs l'exploitation de cette friche implique une opération de défrichage de grande ampleur car la friche est boisée sur plus de 80 % de sa superficie, en outre elle se trouve en zone inondable (en aval de la Marne) et se situe à 100 m d'une zone Ramsar ce qui serait donc incompatible avec la règle du SRADET « non au détriment des fonctions écosystémiques des espaces forestiers, naturels et agricoles »</p>


Commune Bettancourt-la-Ferrée :

Friche sans projet (Les Minières)
Surface de 6.4 ha

<p><i>Figure 4 : Localisation de la friches Les Minières référencées sur la commune Bettancourt-la-Ferrée (52) (source : Cartofriches)</i></p>
<p>La surface est fortement boisée et nécessiterait un défrichage ce qui serait donc incompatible avec la règle du SRADET « non au détriment des fonctions écosystémiques des espaces forestiers, naturels et agricoles »</p>

Commune de Saint Dizier :

Friche avec projet
Surface de 0.3 ha

<p><i>Figure 5 : Localisation de la friches référencées sur la commune Saint Dizier (52) (source : Cartofriches)</i></p>
<p>La surface est trop petite pour y implanter un projet, en outre, le site a fait l'objet d'un appel à projet Fonds Vert 2023, par ailleurs, une démolition est nécessaire tandis que le site se situe à proximité d'habitations.</p>

Friche avec projet
Surface de 0.1 ha

<p><i>Figure 6 : Localisation de la friches référencées sur la commune Saint Dizier (52) (source : Cartofriches)</i></p>
<p>La surface est trop petite pour y implanter un projet, en outre, le site a fait l'objet d'un appel à projet Fonds Vert 2023, par ailleurs, une démolition est nécessaire tandis que le site se situe à proximité d'habitations.</p>

Après analyse des terrains sur le territoire, **aucune de ces friches, potentielles ou avérées**, n'offre la possibilité d'implantation d'une centrale solaire. Par ailleurs, ce type de projet solaire aurait nécessité une modification des zonages inscrits dans le document d'urbanisme de la commune ainsi qu'un **défrichement**.

Concernant la justification du choix du site d'implantation, TotalEnergies souhaite revenir sur la qualité Agrivoltaïque du projet décrit précédemment. Le choix s'est porté non pas sur un foncier, mais sur des exploitants agricoles dynamiques, motivés, volontaires et favorables à la création d'un projet agrivoltaïque ayant du sens. Sur ce projet ce sont bien ces exploitants qui en 2021 ont fait la démarche de contacter TotalEnergies pour rencontrer et échanger sur leur projet.

Par la suite ces exploitants et TotalEnergies ont fait le choix des parcelles d'implantation en fonction des différentes contraintes à laquelle celles-ci pouvaient être soumises.

Finalement le site se justifie par des critères en lien avec l'agrivoltaïsme à savoir synergie, revalorisation des terrains agricoles, et protection des cultures.

En complément des remarques précédentes, le projet a le plus faible impact environnemental et agricole pour les raisons suivantes :

- Du fait de la faible emprise au sol du projet de 6,58 ha soit 8,08 % de la surface totale des parcelles. Ce point est détaillé dans la partie « 7.1 Mesure d'évitement et de réduction, impacts résiduels après mesure » page 41 de l'étude préalable Agricole réalisée par la chambre d'agriculture de la Meuse.
- Du fait de l'implantation de bandes de biodiversité de cultures pérennes, au sein des parcelles de grandes cultures classées en cultures intensives d'après la classification Corinne Land Cover. Ces bandes de biodiversité,ensemencées en herbe permettront d'apporter de la biodiversité culturelle au sein des parcelles d'implantation du projet.

RECOMMANDATION 4

L'Ae recommande au pétitionnaire de comparer les alternatives possibles pour les choix de la technologie des panneaux photovoltaïques et de leur mode d'installation en prenant en compte notamment le moindre impact environnemental (risque de pollution et optimisation du rendement), les possibilités de recyclage et l'aménagement sur site.

REPONSE APPOURTEE

Le projet se compose de deux parties, la première sur des terres de grandes cultures (partie nord), la seconde sur une jachère (partie sud).

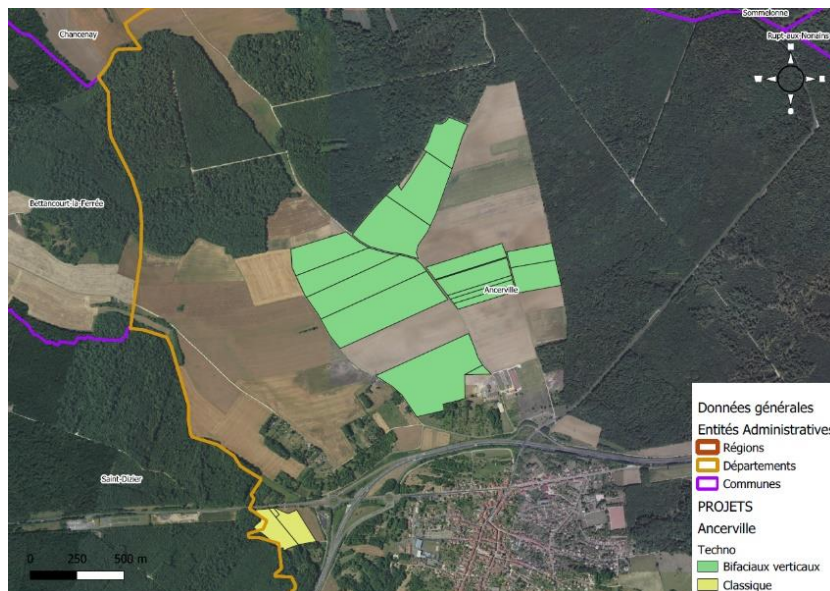


Figure 7 : Plan des parcelles d'implantation du projet Agrivoltaïque TESA par technologie (source : TotalEnergies Renouvelables France)

A ce jour 3 types de technologies photovoltaïques au sol sont possibles : la centrale au sol classique, les trackers, et les panneaux bifaciaux verticaux.

La première technologie, basée sur des panneaux fixes inclinés, permet d'optimiser la production énergétique en orientant les panneaux vers le sud. Cette technologie est reconnue et éprouvée, offrant un bon rapport rendement/économie. Historiquement installée sur des friches industrielles, des terrains dégradés et anthropiques, elle permet de maximiser la production énergétique. Cette technologie s'implante grâce à des pieux vissés ou battus. Les structures au sol fixes, sont compatibles avec la production ovine. Le point bas des structures est placé entre 80 cm et 1.10m permettant le passage aisé des ovins sous les structures. En effet, de nombreuses centrales sont aujourd'hui éco pâturées par des ovins et le retour d'expérience montre une bonne coactivité

Dans le projet agrivoltaïque TESA d'Ancerville, pour la parcelle en jachère (partie sud), l'implantation de la centrale permettra l'élevage ovine, le choix s'est porté sur une technologie de panneaux fixes inclinés qui permet d'apporter

un ombrage à l'herbe³ et aux animaux⁴. Ce système agrivoltaïque représentera 4.5 ha. L'aménagement et le choix de cette technologie a été effectué en lien avec l'exploitant agricole de cette parcelle.

Néanmoins, cette technologie ne convient pas à la partie Nord du projet en grande culture, en effet, ce type de structure a une surface projetée au sol trop importante c'est pourquoi cette technologie n'as pas été choisie pour cette seconde partie du projet.

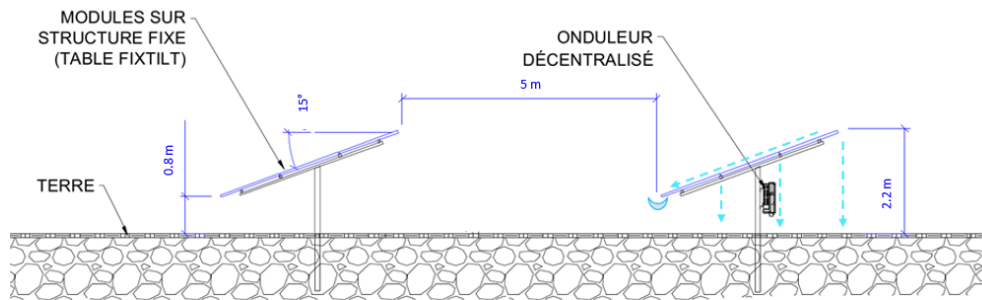


Figure 8 : Représentation type de la technologie de panneaux fixe incliné, vue de profil. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

La seconde structure est la structure Bi-faciale Verticale, il s'agit d'une technologie à faible emprise au sol, son orientation est Est-Ouest. Celle-ci a été créée pour des projets agrivoltaïques en grande culture et en élevage, son but est de garantir la mécanisation des parcelles par son espacement et sa faible emprise au sol. De plus, par son implantation la structure a un aspect brise vent et évite ainsi l'évapotranspiration des cultures. Cette technologie ne demande aucun terrassement et aucune artificialisation du sol, il s'agit d'une implantation en pieux vissés ou battus.

Sur le projet agrivoltaïque TESA d'Ancerville, il s'agit de la zone nord, la technologie bifaciale verticale sera implantée sur un projet de grandes cultures. Cette structure sera implantée sur 77 hectares. La hauteur au point haut est de 3 mètres. L'inter-rang est de 14 mètres, pour une bande de culture de 12 mètres. Une bande enherbée d'un mètre de chaque côté des pieux sera implantée. La technologie et son espacement ont été choisis par les exploitants afin que le projet soit compatible avec leur mode de production et les outils agricole déjà présents sur leurs exploitations.



³ Annexe 1 : [MADEJ Loan 2020 Dynamique végétale.pdf](#)

⁴ Annexe 2 : [COM-rapport-etude-bien-etre-animal-INRAE-CVE-STATKRFAT-v2.pdf](#)

Figure 9 : Représentation de la bande cultivée et de la bande enherbée – zone panneaux verticaux. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

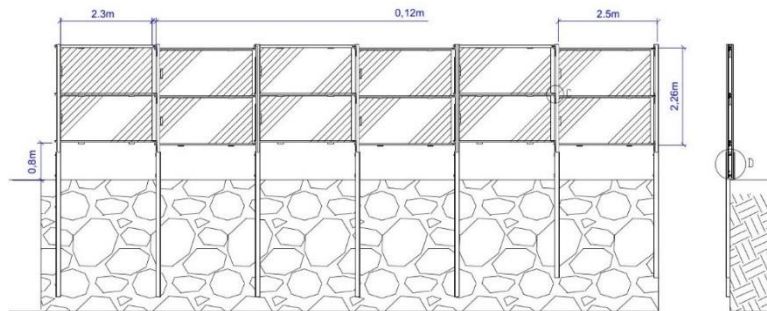


Figure 10 : Représentation de la technologie de panneaux verticaux bifaciaux, vue de profil, et de face. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

Enfin la dernière technologie possible est le tracker Mono-pieux et mono-Axe, bénéficie d'une orientation Est/Ouest. Les trackers sur grandes cultures peuvent être possible. Il s'agit d'une technologie mobile, dite « rotative » et qu'il est possible de piloter selon les besoins de la culture. Leur inclinaison varie ainsi de « -55° à +55° ». Lors des interventions de l'agriculteur, les panneaux pourront être mis à la verticale (angle de 85°) pour faciliter le passage des engins. Dans cette configuration, la hauteur de la structure est de 3m. L'inter-rang des rangées de panneaux peut être de 3 à 14 m. Une bande enherbée d'un mètre de chaque côté des pieux sera implantée.

Cependant, cette technologie ne peut s'adapter aux pentes, or dans ce projet les terrains que les exploitants veulent planter avec des technologies agrivoltaïques ne permettent pas l'implantation de cette technologie. Soit les pentes sont trop importantes soit au sein de ces parcelles il y a la présence de rupture de pente qui empêche l'implantation de cette technologie.

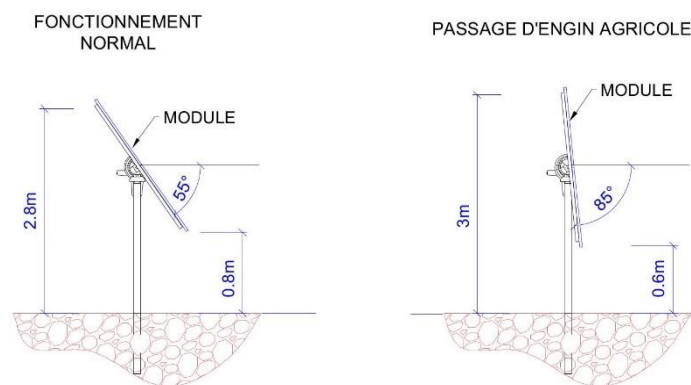


Figure 11 : Représentation de la technologie de panneaux trackers, vue de face. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

L'ensemble de ces technologies sont totalement réversible, aucune artificialisation (GABION LONGRINES), ni fondation ne sont essentiels à la mise en place de ces structures ou de nos éléments bâtis. Comme il s'agit de pieux battus ou de pieux vissés, lors du démantèlement il suffit d'extraire les pieux du sol pour rendre au terrain son état initial.

Pour répondre à l'AE sur l'aménagement du site, il est judicieux de préciser que l'ensemble du site a été réfléchi dans le but d'avoir le moindre impact lors son exploitation agricole. Les contraintes concernant la profondeur d'implantation des pieux sera défini lors des études géotechniques réalisées lors de la préparation de la phase chantier.

De plus, le risque de pollution est détaillé dans la recommandation n°11 : « *Les pieux de fondation des panneaux seront en acier galvanisé. Ce matériau est résistant à la corrosion, il est donc durable et ne présente pas de risque de pollution des nappes souterraines.* »

Enfin , il est nécessaire de rappeler que TotalEnergies adhère à la charte de recyclage SOREN. À la fin de leur vie, les panneaux photovoltaïques suivront un cycle de recyclage strict :

- le verre, l'aluminium et le cuivre sont réutilisés directement
- le silicium subit un traitement spécial pour séparer l'argent du silicium
- des éléments composites sont récupérés pour être valorisés énergétiquement
- seuls 6% des résidus ne peuvent être recyclés pour le moment.

RECOMMANDATION 5

Aussi l'Ae recommande au pétitionnaire de :

- ***régionaliser ses données d'équivalence de consommation électrique par foyer ; préciser le temps de retour énergétique de sa propre installation, en prenant en compte l'énergie utilisée pour le cycle de vie des installations et des équipements (extraction des matières premières, fabrication, installation, démantèlement, recyclage) ainsi que celle produite par l'installation et selon la même méthode, le temps de retour relatif aux émissions de GES ;***
- ***préciser, selon la méthode, le gain annuel attendu en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en tonnes de CO2 sur la durée de vie de la centrale (30 ans).***

L'Ae signale à cet effet qu'elle a publié, dans son recueil « Les points de vue de la MRAe Grand Est », pour les porteurs de projets et pour la bonne information du public, ses attentes relatives à une meilleure présentation des impacts positifs des projets d'énergies renouvelables (EnR) et des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Elle signale également la publication d'un guide ministériel sur la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact.

REPOSE APPORTEE

Une Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une estimation des impacts environnementaux d'un produit ou d'une installation du « berceau à la tombe ». La fabrication (matières premières et énergie), le transport, l'installation, l'exploitation et le démantèlement sont ainsi pris en compte. La réalisation des ACV doit être normalement spécifique et normalisée au niveau international. D'après la norme ISO 14040, l'ACV est une « *compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* ».

Il existe deux approches pour réaliser une ACV :



La première approche est dite « attributionnelle », c'est-à-dire que le bilan carbone est calculé par rapport à la situation actuelle avec des hypothèses constantes dans le temps.

À l'inverse, la seconde approche est dite « conséquentielle » car les hypothèses varient dans le temps en fonction des changements supposés, induits par la centrale (comportement des acteurs, surconsommation, etc).

Pour le présent Bilan Carbone, l'approche « attributionnelle » a été retenue. Afin d'obtenir des données précises et fiables, les calculs de CO2 économisés ainsi que l'équivalence de consommation électrique par foyer sont définis à partir des données de l'INSEE, ENEDIS, l'ADEME. Ces calculs prennent en compte :

1. la fabrication des modules,
1. le transport des modules,
2. la fabrication des onduleurs,
3. la fabrication des transformateurs,
4. la fabrication et transport des supports,
5. la fabrication des composants électriques,
6. l'installation,
7. la fin de vie des panneaux.

On se base donc sur des facteurs d'émission de référence pour effectuer les calculs.

ACV PAS 3 : Synthèse des émissions carbone			Source
Fabrication des modules	g CO2 eq / Wc	510,00	ACV PAS 3 (2021) réalisée grâce au logiciel SIMAPRO (version 9.0), la base de données ECOINVENT (Version 3.5) et des valeurs spécifiques extraites de l'ACV des modules DM460M6-72HSW.
Transport des modules	g CO2 eq / Wc	14,00	
Fabrication des onduleurs	g CO2 eq / Wc	33,80	
Fabrication des transformateurs	g CO2 eq / Wc	13,30	
Fabrication et transport des supports	g CO2 eq / Wc	417,00	
Fabrication des composants électriques	g CO2 eq / Wc	6,90	
Installation	g CO2 eq / Wc	53,10	
Fin de vie des panneaux solaires	g CO2 eq / Wc	0,04	
Facteur d'Emission de l'ACV de référence ("FE acv	g CO2 eq / kWh	31,0	
Emissions Carbone par Wc de l'ACV de référence ("EC acv ref")	g CO2 eq / Wc	1048	

Figure 12 : Synthèses des émissions de carbone. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

On détermine par la suite le facteur d'émission de la centrale Agrivoltaïque TESA d'Ancerville avec la formule suivante :

$$[FE \text{ centrale étudiée}] = [EC \text{ acv ref}] * [Puis. Instal \text{ centr. étudiée}] / [Dur. Exploit. \text{ centr. étudiée}] / [Prod Ann. Moyen. \text{ centr. étudiée}]$$

EC acv ref : Emissions Carbone par Wc de l'ACV de référence

Dur. Exploit. centr. étudiée : Durée d'exploitation de la centrale étudiée

Prod Ann. Moyen. centr. étudiée : Production Annuelle Moyenne

On obtient donc les résultats suivants :

	TESA	
Facteur d'émission de la centrale étudiée	g CO2 eq / kWh	25,7
CO2 destocké par des mesures de coupes	t de CO2	NC
CO2 séquestré lié à des mesures compensatoires	t de CO2	NC
CO2 émis par la centrale durant sa durée de vie	t de CO2	24 778
CO2 émis pour produire la même quantité d'électricité par rapport ...	t de CO2	
... au mix électrique européen		305 268
... au mix électrique français (ou de la ZNI* si non applicable)		61 631
CO2 évité sur la durée de vie de la centrale étudiée par rapport...	t de CO2	
... au mix électrique européen		280 490
... au mix électrique français (ou de la ZNI* si non applicable)		36 853
CO2 évité annuellement pour la centrale étudiée par rapport...	t de CO2	
... au mix électrique européen		7 012
... au mix électrique français (ou de la ZNI* si non applicable)		921
Temps de retour énergétique par rapport...	en années	
... au mix électrique européen		3,2
... au mix électrique français (ou de la ZNI* si non applicable)		16,1
CO2 évité équivalent en nombre d'Aller-Retours Paris-New-York annuels en avion pour une personne par rapport...	t de CO2	
... au mix électrique européen		3 896
... au mix électrique français (ou de la ZNI* si non applicable)		512
Production équivalente à la consommation électrique, hors chauffage, de X...	t de CO2	
... français indépendamment de leur lieu d'habitation		15 915
... français habitant dans le département d'implantation de la centrale)		15 287

Figure 13 : Synthèses des Résultat d'émission de carbone du projet TESA d'Ancerville. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

- Temps de retour énergétique

Pour la centrale Agrivoltaïque TESA d'Ancerville, d'une puissance installée de 23.64 MWc et pour un productible de 1100 heures annuelles, le CO2 émis par la centrale durant sa durée de vie est de 24 778 T.

En comparaison, pour produire la même quantité d'électricité par rapport au mix énergétique français, 61 631 T de CO2 serait émis. La centrale photovoltaïque TESA d'Ancerville permettrait ainsi d'éviter l'émission de 36 853 T de CO2 selon le mix énergétique français.

Ainsi, le temps de retour énergétique par rapport au mix européen est estimé à **3.2 ans**, et par rapport au mix énergétique français à **16.1 ans**.

- Equivalence de la consommation électrique par foyer régionalisée

D'après les données de l'INSEE et d'ENEDIS la consommation électrique (hors chauffage) par habitant du département de la Meuse est de 1.6 MWh/habitant/an.

La consommation en chauffage électrique ne représente que 35% du type de chauffage en France⁵. Les ménages utilisent différentes énergies pour couvrir leurs besoins énergétiques, notamment pour chauffer leur logement : le gaz de ville, le fioul, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le bois, le chauffage urbain. 39 % des ménages chauffent principalement leur logement au gaz, 12 % utilisent en premier lieu du fioul pour le chauffage, 5 % du bois, 4 % sont reliés à un réseau de chauffage urbain et 1 % ont recours au GPL. Par ailleurs, près de 3 % se chauffent via l'énergie solaire thermique ou grâce à une pompe à chaleur

Production équivalente à la consommation électrique, hors chauffage, de X...	t de CO2
... français indépendamment de leur lieu d'habitation	15 915
... français habitant dans le département d'implantation de la centrale)	15 287

Figure 14 : Résultat de la production en équivalant de la consommation électrique par habitant. (source : TotalEnergies Renouvelables France)

En 2021, la taille moyenne des ménages est de 2,16⁶ personnes par résidence. La centrale Agrivoltaïque TESA d'Ancerville pourra couvrir la consommation de **15 287** habitants soit **7 077** foyers.

⁵ Les acteurs économiques et l'environnement, édition 2017 - Insee Référence

⁶ [Taille des ménages | Insee](#)

RECOMMANDATION 6

L'Ae rappelle que les travaux de raccordement font partie intégrante du projet et que, si ces derniers ont un impact notable sur l'environnement, ils devront faire l'objet d'un complément à l'étude d'impact évaluant les impacts et proposant des mesures d'évitement, de réduction et le cas échéant de compensation de ceux-ci. Ce complément éventuel devra être transmis à l'Ae pour avis préalable à la réalisation des travaux de raccordement.

REPONSE APPOREE

Les impacts potentiels liés aux travaux de raccordement sont évalués sur la base des informations transmises par ENEDIS et détaillés dans la partie « 4.6. Evaluation des impacts du projet prévisionnel de raccordement », page 189 de l'étude d'impact.

Le tracé de raccordement prévisionnel ne traverse aucune zone naturelle d'intérêt remarquable ni aucun site Natura 2000. Par ailleurs, les tranchées réalisées en phase chantier ne traversent aucun terrain naturel. L'étude d'impact conclut que les travaux de raccordement n'auront aucun impact significatif sur les milieux naturels.

RECOMMANDATION 7

L'Ae recommande au pétitionnaire de vérifier la compatibilité du raccordement envisagé avec le Schéma régional de raccordement au réseau des énergies renouvelables (S3REnR) de la région Grand Est et d'intégrer dans l'étude d'impact le tracé du raccordement définitif, même si celui-ci devait être différent de celui prévu actuellement.

REPONSE APPORTEE

TotalEnergies rappelle que dans le cadre du projet Agrivoltaïque TESA d'Ancerville, le raccordement au réseau électrique national sera réalisé et sous maîtrise d'ouvrage d'ENEDIS.

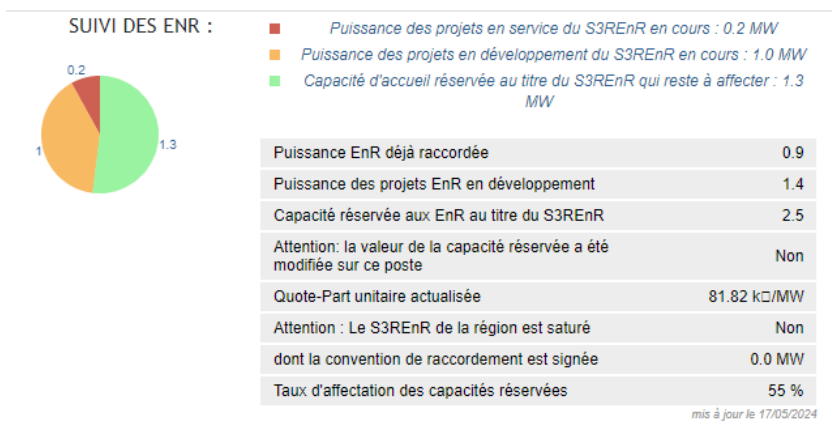
La procédure en vigueur prévoit l'étude détaillée par ENEDIS du raccordement de la centrale agrivoltaïque une fois le permis de construire obtenu. Ainsi, le tracé définitif du câble de raccordement ne sera connu qu'une fois cette étude réalisée. Les résultats de cette étude définissent de manière précise la solution et les modalités de raccordement.

Cet ouvrage de raccordement, qui sera intégré au Réseau de Distribution fera l'objet d'une demande d'autorisation par Enedis. Cette autorisation sera demandée par le Gestionnaire du Réseau de Distribution qui réalisera les travaux de raccordement du parc agrivoltaïque. Le financement de ces travaux reste à la charge du maître d'ouvrage de la centrale agrivoltaïque. En revanche, le raccordement final est sous la responsabilité d'Enedis.

La centrale agrivoltaïque TESA d'Ancerville n'ayant pas encore obtenu de permis de construire, l'hypothèse de cheminement a toutefois été établie, le raccordement au poste source de Maraval (commune de Saint Dizier) serait le plus envisageable.

A la date du dépôt du dossier en mai 2023 celui-ci présentait encore une capacité d'accueil.

Aujourd'hui la solution envisageable est un raccordement sur le poste source de « Marnaval » . Le poste source a la capacité de transformation, restante disponible pour l'injection sur le réseau publique de distribution 43.8 MW, il est donc possible de s'y raccorder. Les caractéristiques du poste sont présentées dans la figure suivante :



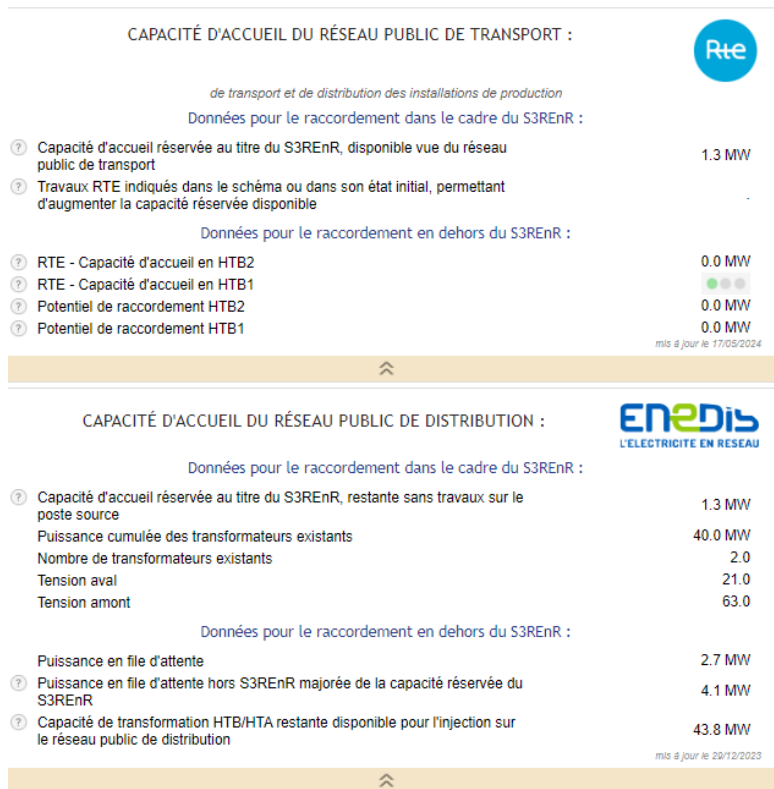


Figure 15 : Caractéristiques du poste source de MARNAVAL. (source : Capareseau)

Le tracé potentiel du raccordement de la centrale Agrivoltaïque se présenterait comme ci-dessous :

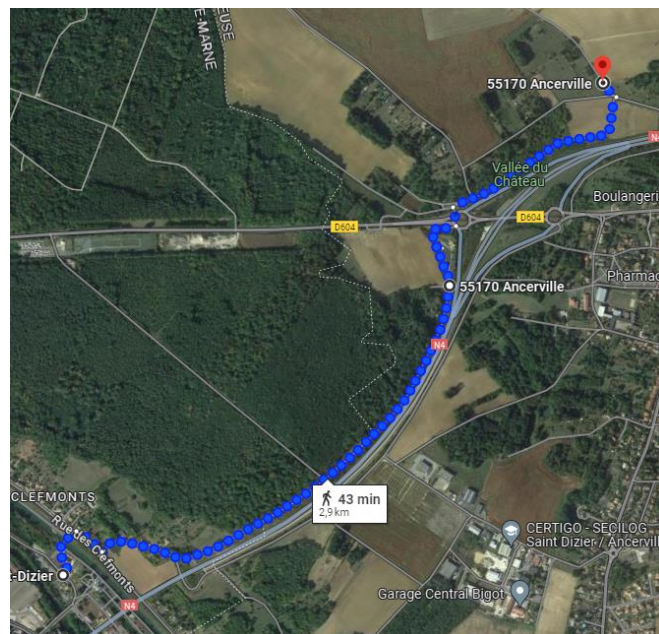


Figure 16 : tracé potentiel du raccordement de la centrale Agrivoltaïque TESA d'Ancerville

Encore une fois TotalEnergies précise que le tracé définitif ne sera déterminé qu'une fois le permis obtenu. **Au vue de l'hypothèse ci-dessus, celui-ci reste compatible avec le S3REnR.**

II. REPONSES RELATIVES AUX RECOMMANDATIONS DE L'AUTORITE ENVIRONNEMENTALE EMISES SUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT PAR LE PROJET

II.A. LES MILIEUX NATURELS ET LA BIODIVERSITE

RECOMMANDATION 8

L'Ae rappelle par ailleurs qu'en application de la loi pour la reconquête de la biodiversité du 8 août 2016 (article L.411-1A du code de l'environnement) les maîtres d'ouvrage, publics ou privés, doivent contribuer à l'inventaire du patrimoine naturel par la saisie ou, à défaut, par le versement de données brutes de biodiversité (recueillies par observation directe sur site, par bibliographie ou acquises auprès d'organismes officiels et reconnus) sur la plateforme DEPOBIO qui recense l'ensemble des ressources liées au processus de versement des données. L'objectif de ce dispositif est l'enrichissement de la connaissance en vue d'une meilleure protection du patrimoine naturel de la France. Le téléversement sur ce site génère un certificat de téléversement, document obligatoire et préalable à la tenue de l'enquête publique.

REPONSE APPOREE

Le versement des données brute de biodiversité sera bien réalisé sur la plateforme DEPOBIO avant le début de l'enquête publique.

II.B. LE PAYSAGE ET LES CO-VISIBILITES

RECOMMANDATION 9

L'Ae recommande au pétitionnaire, pour une meilleure insertion paysagère du projet de :

- ***réévaluer les impacts du projet sur le paysage en ce qui concerne le secteur nord ;***
- ***compléter l'étude en présentant un volet réduction des impacts à la hauteur de impacts du projet sur les chemins parcourant le secteur nord, en particulier le chemin de Chancenay et le chemin menant à la forêt domaniale de Valtiermont-Jovilliers ;***
- ***proposer une insertion paysagère du projet par la mise en place de haies et de bosquets afin de créer un lien paysager entre la Zone d'Implantation Potentielle (ZIP) et les marqueurs paysagers existant sur site (haies, bosquets, arbres, prés vergers).***

REPONSE APPOREE

Afin d'apporter une réponse à cette recommandation, le bureau d'études Atedev, qui a réalisé le volet paysager de l'étude d'impact a été sollicité, leur expertise est détaillée ci-après.

Le chapitre IV « Description des incidences notables du projet sur l'environnement et des mesures prévues pour éviter, réduire et si nécessaire compenser » de l'étude d'impact évalue les effets du projet sur les perceptions paysagères depuis les chemins à proximité de la ZIP, et notamment du secteur Nord.



TotalEnergies

Tout d'abord en phase chantier, « les travaux permettant la mise en place et le démantèlement de la centrale photovoltaïque TESA engendreront une restriction provisoire de la circulation liée à la présence d'engins de chantier en bordure de ces chemins ou sur ceux-ci. Cette disposition répond à un besoin de sécurité, et sera temporaire. Les activités de promenade sur les chemins de Chancenay, des Savlons et d'Ancerville seront toujours possibles ».

En phase d'exploitation, l'étude souligne que la « sensation d'enclavement pouvant être ressentie sur le chemin de Chancenay (cf. photomontage 1 en page 144), du fait de l'implantation de panneaux de part et d'autre du chemin, sera atténuée par le contexte topographique vallonné et de la hauteur des panneaux (2,80 mètres). En effet, ceux-ci permettent une perception dégagée sur l'horizon lointain. Comme illustré sur les photomontages 1 et 2 du secteur Nord, la perception des forêts domaniales et communales est intacte. L'enclavement pourrait aussi être ressenti par la présence de clôtures autour des parcelles de l'emprise du projet, bien que celles-ci répondent à un besoin de sécurisation du site ». En particulier, « sur le secteur Nord, les clôtures sont visibles le long du chemin de Chancenay, des deux côtés, sur 510 mètres environ (cf. photomontage 1), et le long des parcelles ZC65, ZC66 et ZC67 sur le chemin menant à la forêt domaniale de Valtiermont-Jovilliers (cf. photomontage 2) ».

Il est rappelé par ailleurs que les chemins étudiés sont peu fréquentés, essentiellement empruntés par les engins agricoles et quelques promeneurs ponctuels, ce qui permet de conclure à un impact négatif faible du projet sur ces derniers.

Les mesures suivantes ont ensuite été proposées afin de réduire l'impact du projet dans la perception du paysage par le riverain et son expérience de promenade sur les chemins cités précédemment :

- Le maintien de l'activité agricole entre les rangées de panneaux suggère une harmonie entre deux activités bien distinctes et répondant toutes deux aux tendances de consommation de la société actuelle. Cette symbolique jouera en faveur de l'acceptation et l'intégration du projet dans le paysage.
- Un recul variant de 10 à 30 m des panneaux par rapport aux chemins évoqués sera maintenu. Cette mesure supplémentaire permettra de réduire la sensation d'enclavement depuis ces derniers.
- Un espacement prévu de 14 m entre chaque rangée de panneaux sur le secteur Nord participera à l'aération de l'espace.

De plus, les panneaux ne font pas tous face aux chemins, leur orientation variant d'un îlot à l'autre, ce qui réduit considérablement l'effet de masse que ces derniers pourraient avoir s'ils avaient tous été implantés selon une même orientation. Les promeneurs sont donc amenés à voir, au fur et à mesure de leur progression sur les chemins, les premiers panneaux des rangées pouvant leur faire face, mais également des panneaux en oblique ou de profil qui permettent de conserver des perceptions lointaines au travers des rangées sur le paysage qui les entoure.

Pour la clôture, une structure grillagée en transparence sera privilégiée. En effet, un habillage de la clôture par végétalisation intégrée, par exemple, aurait un véritable effet de cloisonnement, créant une barrière plus opaque et soulignant la présence de la clôture.

Concernant la suggestion de la MRAe de mettre en place des haies et des bosquets sur le secteur Nord, cette possibilité a été étudiée et n'a pas été retenue. En effet, le secteur Nord correspond à un paysage encadré de boisements épais, mais avant tout dégagé, avec des perceptions lointaines possibles par les vallonnements qu'il présente. La mise en place de haies denses et relativement hautes, nécessaires pour cacher efficacement les panneaux, modifierait profondément le paysage qui en est initialement dépourvu (paysage d'openfield, non bocager). L'implantation d'un tel élément non présent initialement dans ce paysage aurait pour effet un cloisonnement de ces espaces ouverts et une perte de cohérence paysagère.

RECOMMANDATION 10

L'Ae attire par ailleurs l'attention du pétitionnaire sur la prescription de la DRAC en vue de la réalisation d'un diagnostic archéologique, et recommande au pétitionnaire de se rapprocher de ses services en vue d'en préciser les modalités de mises en oeuvre.

REPOSE APPOREE

Le pétitionnaire est déjà en relation avec l'INRAP dans le cadre d'un diagnostic archéologique.

II.C. LA RESSOURCE EN EAU

RECOMMANDATION 11

Aussi l'Ae recommande au pétitionnaire de :

- **préciser la profondeur de la nappe au droit du projet ;**
- **expliciter ses choix techniques pour l'ancrage (profondeur des pieux, matériaux utilisés et résistance à la corrosion...);**
- **démontrer que les pieux de fondation des panneaux ne vont pas augmenter le risque de pollution des nappes d'eau souterraine, notamment en cas d'incendie, et qu'ils relèvent de la meilleure technologie pour la protection de l'environnement à cet endroit (par rapport à des fondations non invasives, par exemple sur longrines, massifs ou semelles en béton posés au sol, qui pourraient en revanche consommer beaucoup plus d'espace).**

Le cas échéant, l'Ae recommande au pétitionnaire de mettre en place un système de surveillance et de suivi régulier de la qualité des eaux souterraines, en amont et à l'aval de la centrale, qui permettra de capitaliser la connaissance de l'impact des pieux sur l'eau de la nappe et de transmettre ce suivi à l'Agence Régionale de Santé (ARS).

REPOSE APPOREE

Le bureau d'études Atedev a été sollicité afin de recueillir leur expertise sur les recommandations précédemment citées.

Une étude géotechnique est prévue en amont de toute implantation des panneaux photovoltaïques et permettra de préciser la profondeur de la nappe au droit du projet.

Rappelons que le chapitre II « État initial – Description des facteurs environnementaux susceptibles d'être affectés de manière notable par le projet » conclut en effet que le secteur du projet ne dispose pas de données de piézométrie précise dans la bibliographie. Rappelons toutefois les données disponibles suivantes :

Concernant la masse d'eau HG215 : Albien-Néocomien libre : « Une carte piézométrique de 1997 de la nappe du Néocomien (Valanginien/Hauterivien) est disponible sur l'espace cartographique du SIGES Seine Normandie. Dans ce secteur, la nappe s'écoule globalement d'est en ouest. La ZIP, situé en limite de la carte piézométrique, est comprise entre les isopièzes de 180 m NGF et 170 m NGF. Rappelons que la topographie s'établit aux alentours de 200 m NGF sur ce secteur. »

Concernant la masse d'eau HG303 : Calcaires tithoniens : « L'ouvrage BSS000RZGH, situé sur la commune de Chancenay à une altitude de 165 m, capte la nappe contenue dans les calcaires du Tithonien inférieur. Celle-ci est



TotalEnergies

Mémoire en réponse à l'avis de la MRAe n°2024APGE24

Projet Agrivoltaïque TESA

contactée aux alentours de 9 m de profondeur. L'ouvrage BSS000RZLF, situé sur la commune d'Ancerville à une altitude de 149 m, captant la même nappe, a fait également l'objet d'un suivi piézométrique entre 1976 et 1983. La chronique montre une nappe comprise entre 1 m et 6 m de profondeur. »

Les pieux de fondation des panneaux seront en acier galvanisé. Ce matériau est résistant à la corrosion, il est donc durable et ne présente pas de risque de pollution des nappes souterraines.

Les résultats de l'étude géotechnique évoquée précédemment justifiera de la nécessité de mettre en place un suivi piézométrique et permettra de préciser les modalités de suivi le cas échéant.

II.D. LE RISQUE INCENDIE

RECOMMANDATION 12

L'Ae recommande au pétitionnaire de se conformer aux préconisations du SDIS en matière de recul à 50 m pour limiter les risques d'incendie en forêt.

REPONSE APPOREE

Le pétitionnaire est déjà en relation avec le SDIS de la Meuse concernant les conditions d'implantation de la centrale agrivoltaïque.

II.D. LE DEMANTELEMENT ET REMISE EN ETAT DU SITE

RECOMMANDATION 13

L'Ae recommande au pétitionnaire de préciser les modalités juridiques et financières garantissant la mise en oeuvre du démantèlement de la centrale à l'issue de l'exploitation.

REPONSE APPOREE Dans le cadre de la centrale agrivoltaïque d'Ancerville, un bail sera signé entre le propriétaire, les exploitants et la société de projet, reprenant toutes les modalités juridiques du démantèlement de la centrale.

Actuellement, les centrales agrivoltaïques ne sont pas classées comme ICPE, (aucune garantie financière de démantèlement n'est demandée. Cependant, dans le bail et à l'issue de son utilisation, l'exploitant s'engage à étudier deux propositions :

- Céder la centrale au propriétaire
- Démanteler la centrale et rendre le terrain

DE PLUS, IL EST NECESSAIRE DE RAPPELER QUE TOTALENERGIES S'ENGAGE A TRAVAILLER AVEC SOREN (ANCIENNEMENT PVCYCLE) POUR LE RECYCLAGE ET LA VALORISATION DES PANNEAUX USAGES.

III. ANNEXES

ANNEXE 1 –DYNAMIQUE VEGETALE SOUS L'INFLUENCE DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES SUR DEUX SITES PRAIRIAUX PATURES, MADEJ LOAN

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

RAPPORT DE STAGE - Octobre 2020

MADEJ LOAN



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

Structure d'accueil : UREP INRAE

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

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

Remerciements

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

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

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

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

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

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

Sommaire

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

I) Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

II) Matériels et méthodes

A) Sites

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

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

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

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

B) Zones d'études

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

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

1. Zones en exclos

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

1.1 Capteurs fixes

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

1.1.1. Station météo

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

1.1.2. Sondes d'humidité et de température du sol

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

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

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

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

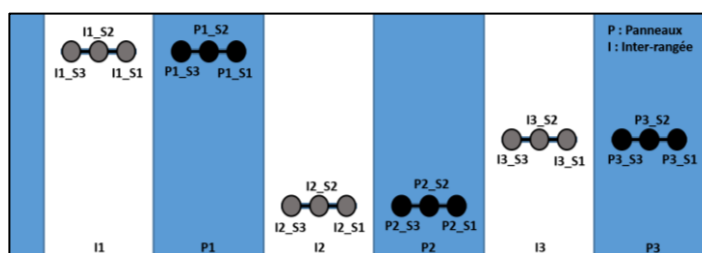


Figure 1 : Schéma de la disposition des sondes au sein des transects en Panneaux (bleu) et Inter-rangée (blanc). Trois rangs de panneaux et d'inter-rangées sont montrés.

1.1.3. Capteurs de rayonnement

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

1.2. Suivi de la végétation

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

Pour suivre l'évolution de la végétation (croissance, biomasse, NDVI) dans la zone d'exclos et connaître l'influence des panneaux solaires, et corrélérer les données microclimatiques aux données sur la végétation, deux transects de trois quadrats fixes de 0,5 x 0,5 m de côté (0,25m²) ont été installés de chaque côté des transects de sondes. Une sonde SMT100 est donc entourée de deux quadrats de végétations. Il y a ainsi 18 quadrats disposés entre trois transects par traitement sur

chaque site.

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

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

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

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

2. Etude dans le reste du site

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

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

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

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

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

C) Traitements des données

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

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

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

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

D) Analyses statistiques

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

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

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

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

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

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

III) Résultats

A) Végétation

1. Diversité végétale

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

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

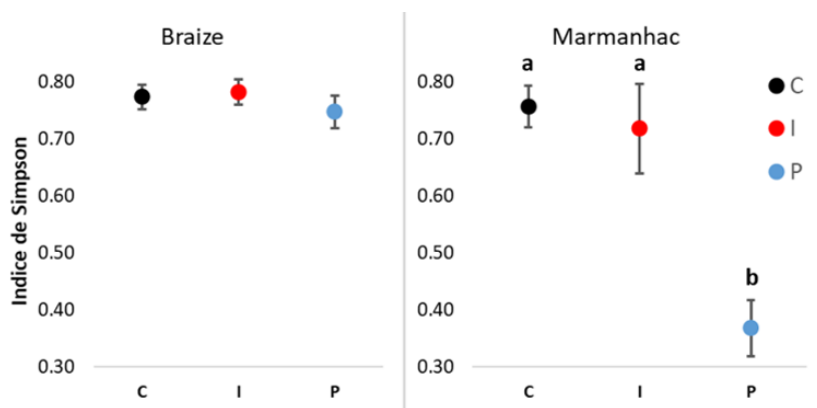
Sur le site de Marmanhac, il y a une différence significative

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

2. Variables biologiques

2.1. Croissance

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

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

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

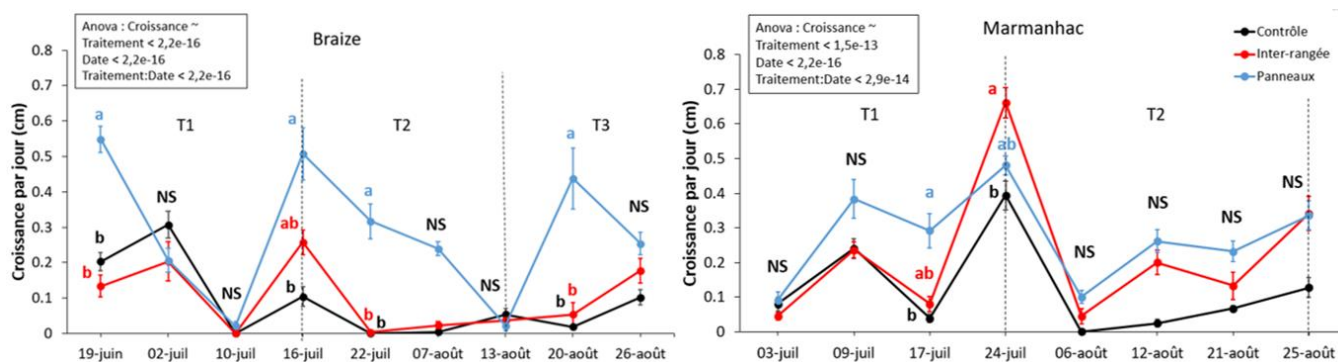


Figure 3 : Dynamique temporelle de la croissance mesurée sur les transects pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) ; NS : $P > 0.05$. Moyenne +/- erreur standard, $n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

2.2. Hauteur de densité

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

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

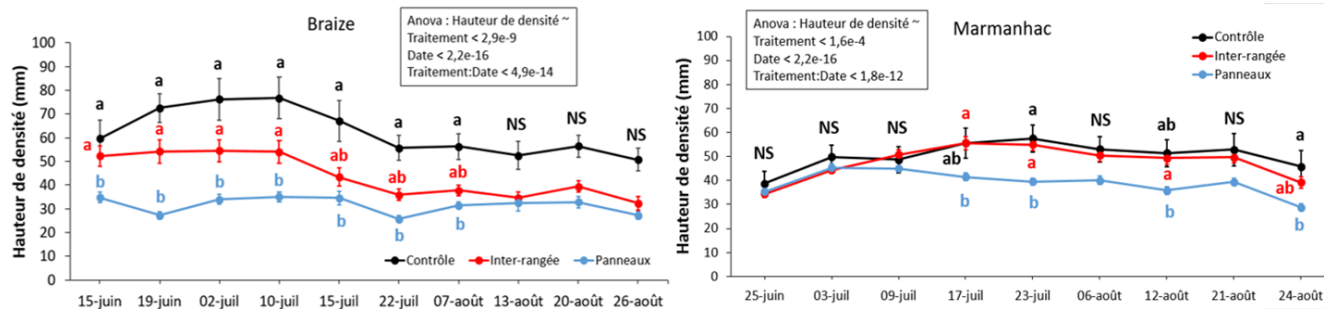


Figure 4 : Dynamique temporelle de la hauteur de densité (mm) pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) ; NS : $P > 0.05$. Moyenne +/- erreur standard, $n : P$ et $I =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

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

2.3. Indice NDVI

2.3.1. Transects

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

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

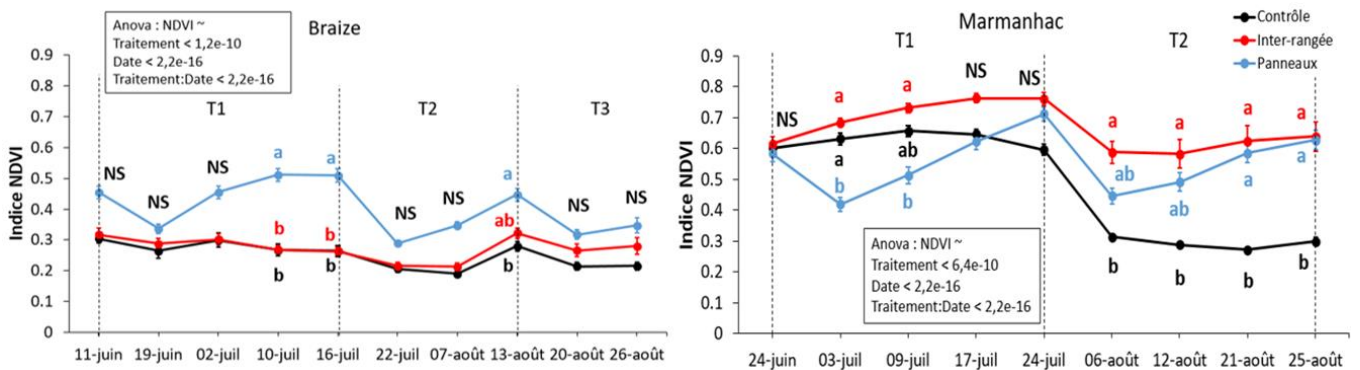


Figure 5 : Dynamique temporelle de l'indice NDVI mesuré sur les transects, pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) NS : $P > 0.05$. Moyenne +/- erreur standard, $n=3$. Dans l'encadré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

2.3.2. Echelle du parc

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

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

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

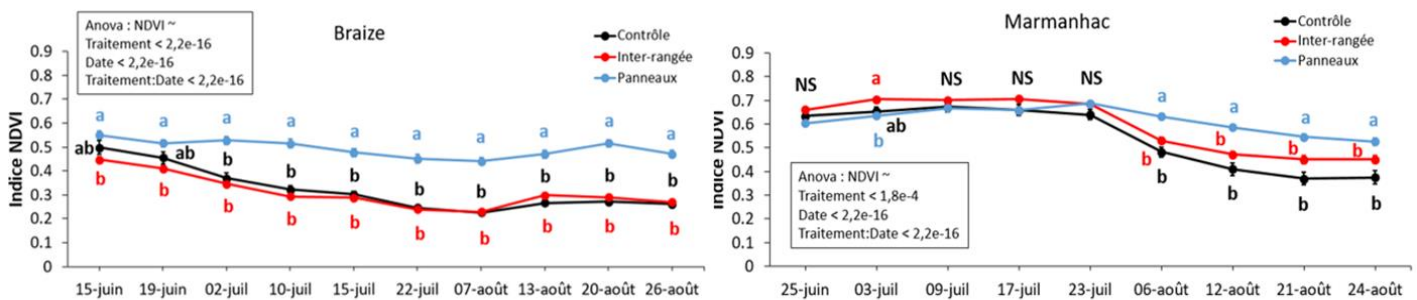


Figure 6 : Dynamique temporelle de l'indice NDVI mesuré sur l'ensemble du parc, pour le site de Braize à gauche et pour le site de Marmanhac à droite. Pour chaque date, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) NS : $P > 0.05$. Moyenne +/- erreur standard, $n = 60$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

2.4. Biomasse

2.4.1. Transects

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

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

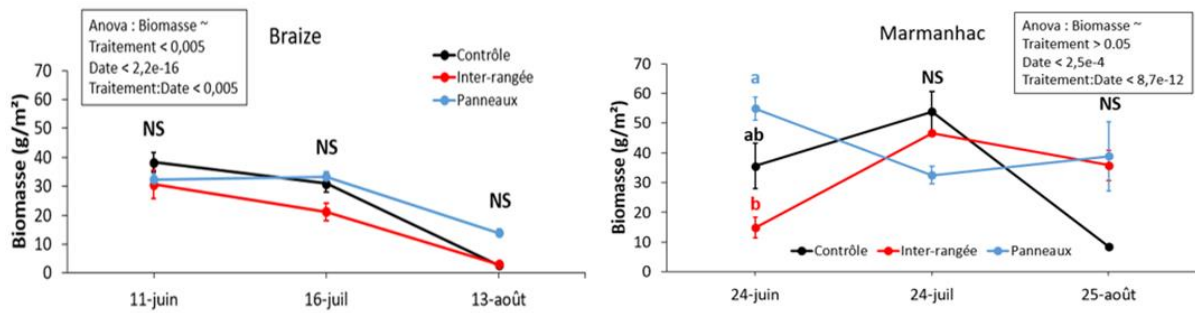


Figure 7 : Production de biomasse pour trois dates mesurées sur les transects pour le site de Braize à gauche et le site de Marmanhac à droite ; Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) ; NS : $P > 0.05$. Moyenne \pm erreur standard, $n =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

2.4.2. Echelle du parc

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

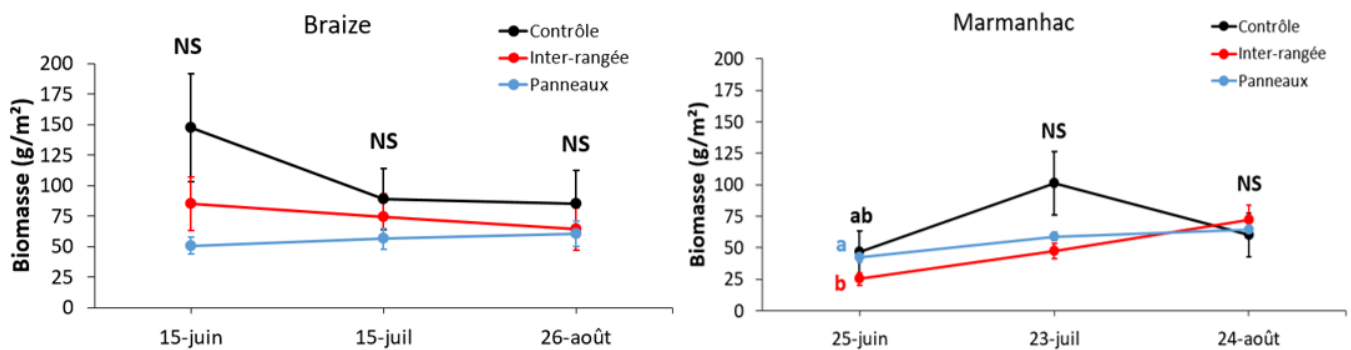


Figure 8 : Biomasse par traitement, mesurée dans le parc pour trois dates de coupes, sur Braize (à gauche) et sur Marmanhac (à droite). Pour chaque date et site, des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0.05$) ; NS : $P > 0.05$. Moyenne \pm erreur standard, $n = 20$ pour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

B) Variables abiotiques

1. Sol nu

1.1. Transect

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

avec plus de sol nu sous le traitement P.

1.2. Echelle du parc

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

2. Température du sol

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

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

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

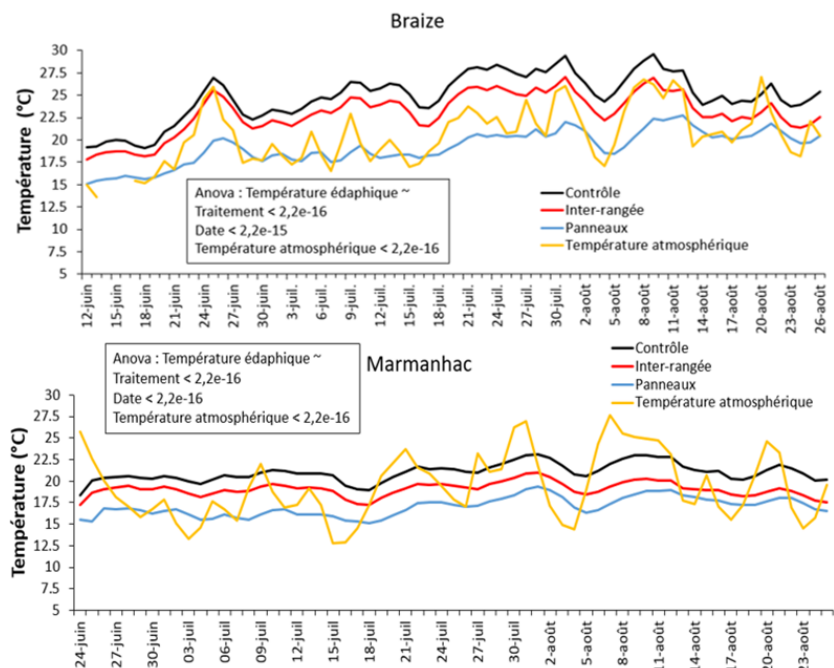


Figure 9 : Dynamique temporelle de la température du sol en fonction des traitements et température de l'air pour le site de Braize (au-dessus) et le site de Marmanhac (en dessous). Braize : Statistique de Fisher : 907,3 sur 4 et 652 DF, p -value : $< 2,2e-16$, R^2 ajusté : 0,85 ; Marmanhac : Statistique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

3. Humidité du sol

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

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

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

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

4. Rayonnement

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

IV) Discussion

A) Diversité végétale

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

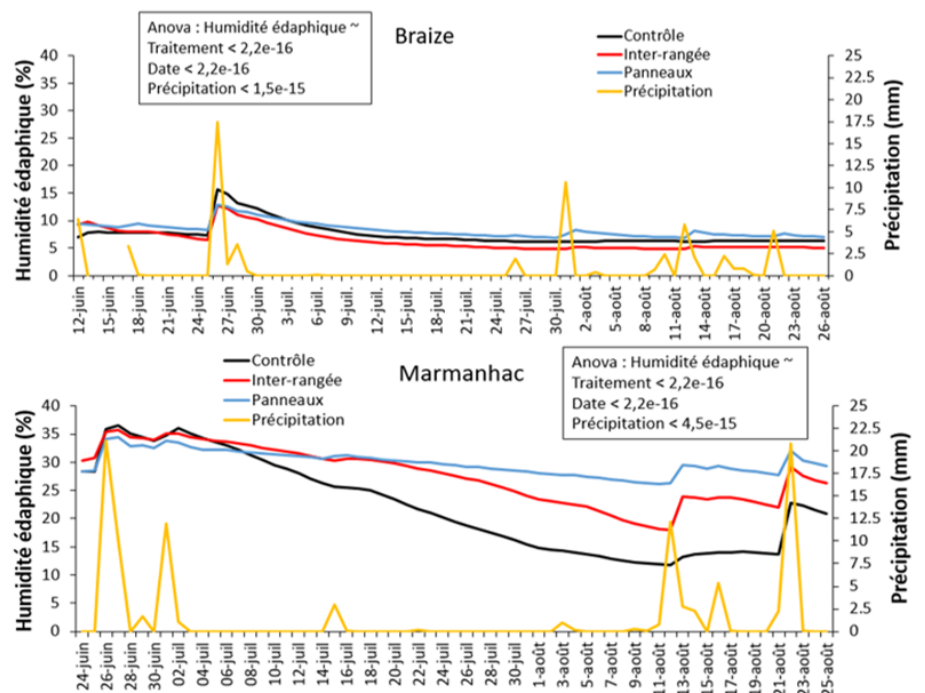


Figure 10 : Dynamique temporelle de l'humidité du sol en fonction des traitements et précipitations pour le site de Braize (au-dessus) et le site de Marmanhac (en dessous). Braize : Statistique de Fisher : 161 sur 4 et 652 DF, p -value : $< 2,2e-16$, R^2 ajusté : 0,49 ; Marmanhac : Statistique de Fisher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

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

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

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

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

B) Croissance

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

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

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

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

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

C) Hauteur de densité

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

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

D) Indice NDVI

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

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

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

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

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

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

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

E) Biomasse

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

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

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

V) Conclusion

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

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

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

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

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

Bibliographie

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

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

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

Annexe

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

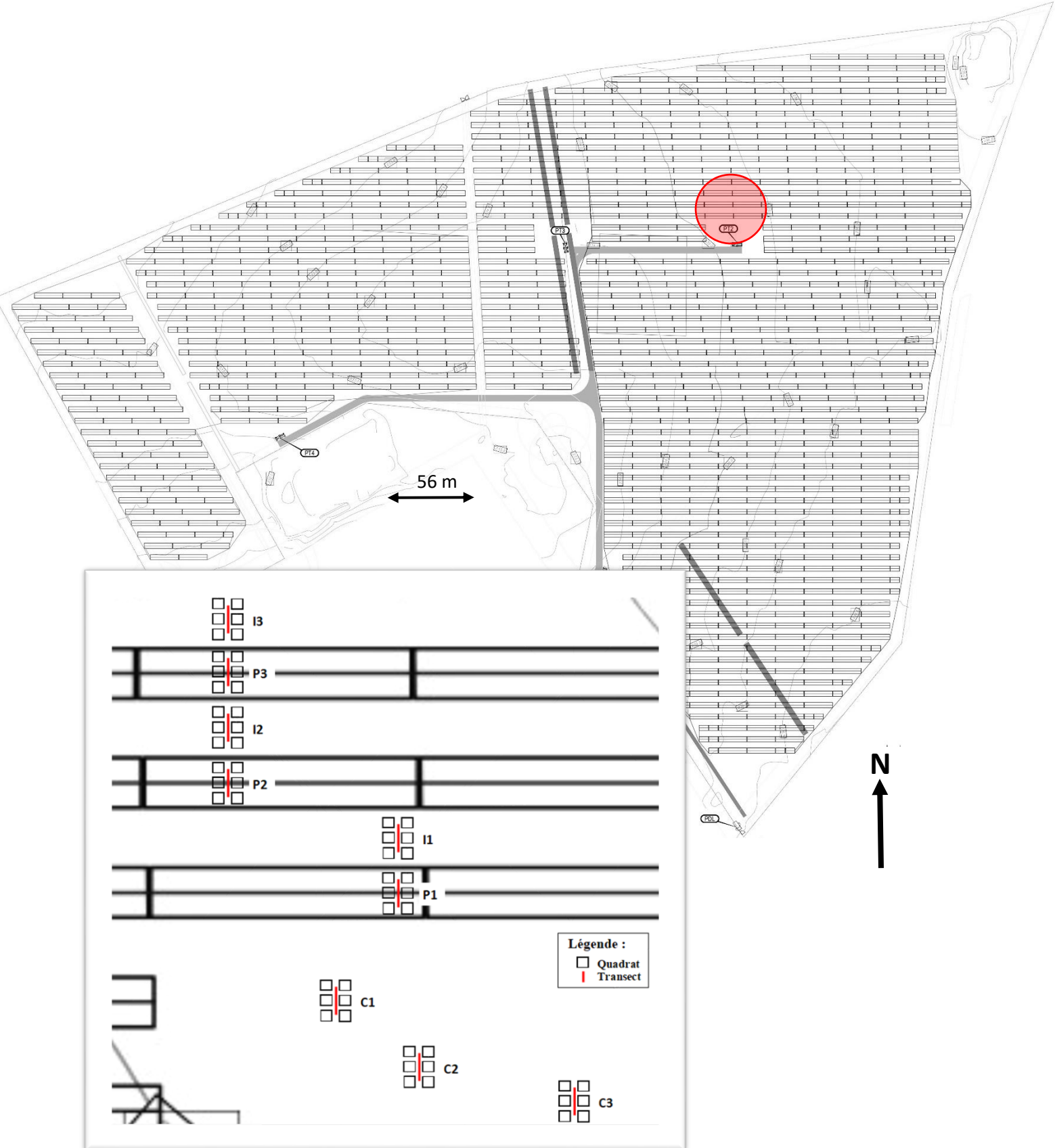
Espèce	Panneaux	Inter-rangée	Contrôle
<i>Achillea millefolium</i>	-	-	-
<i>Agrostis capillaris</i>	-	0.6	-
<i>Anagallis arvensis</i>	-	-	1.1
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	-	-	-
<i>Bromus hordeaceus</i>	0.3	0.6	1.1
<i>Bromus sterilis</i>	0.3	-	-
<i>Caardus sp.</i>	0.1	-	-
<i>Capsella bursa-pastoris</i>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

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

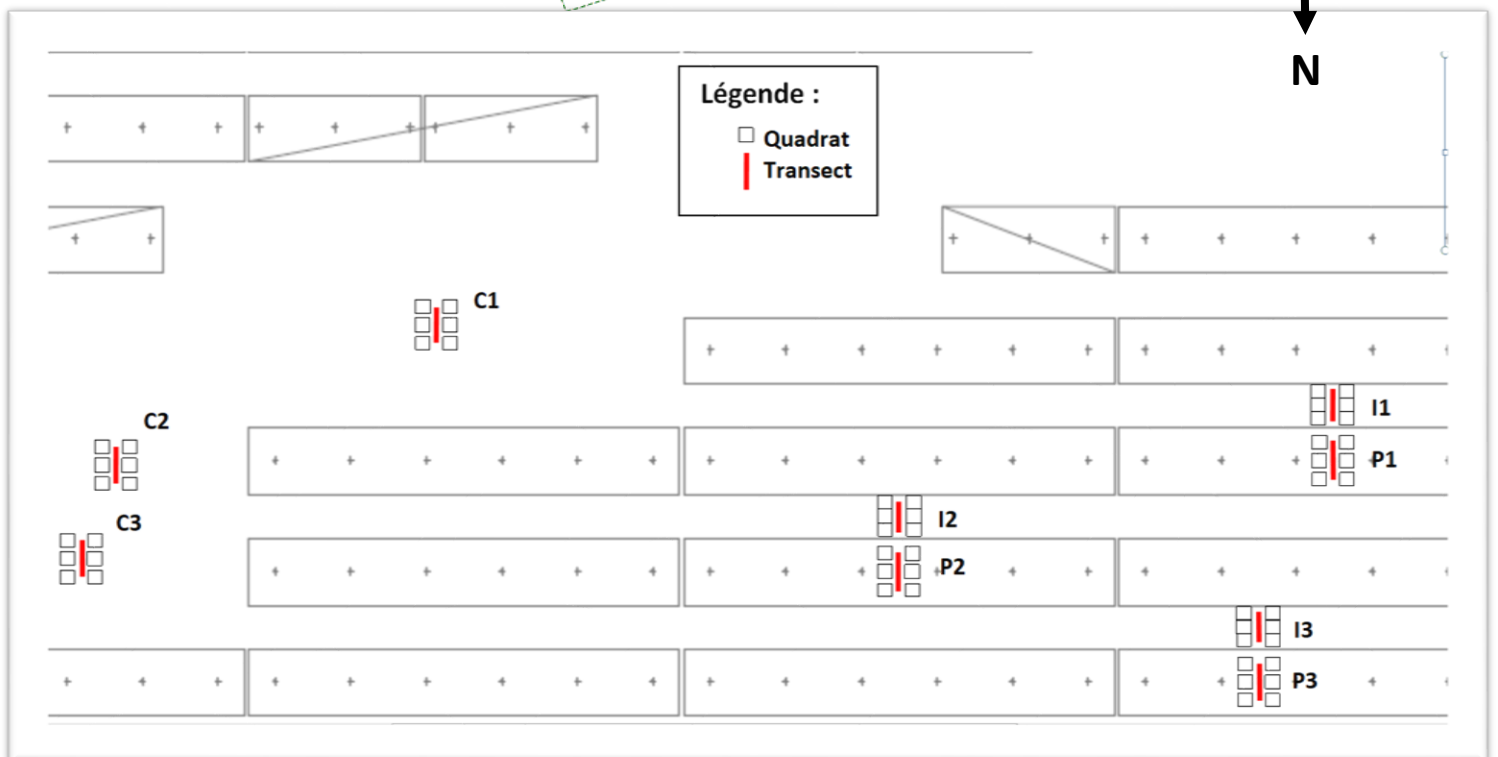
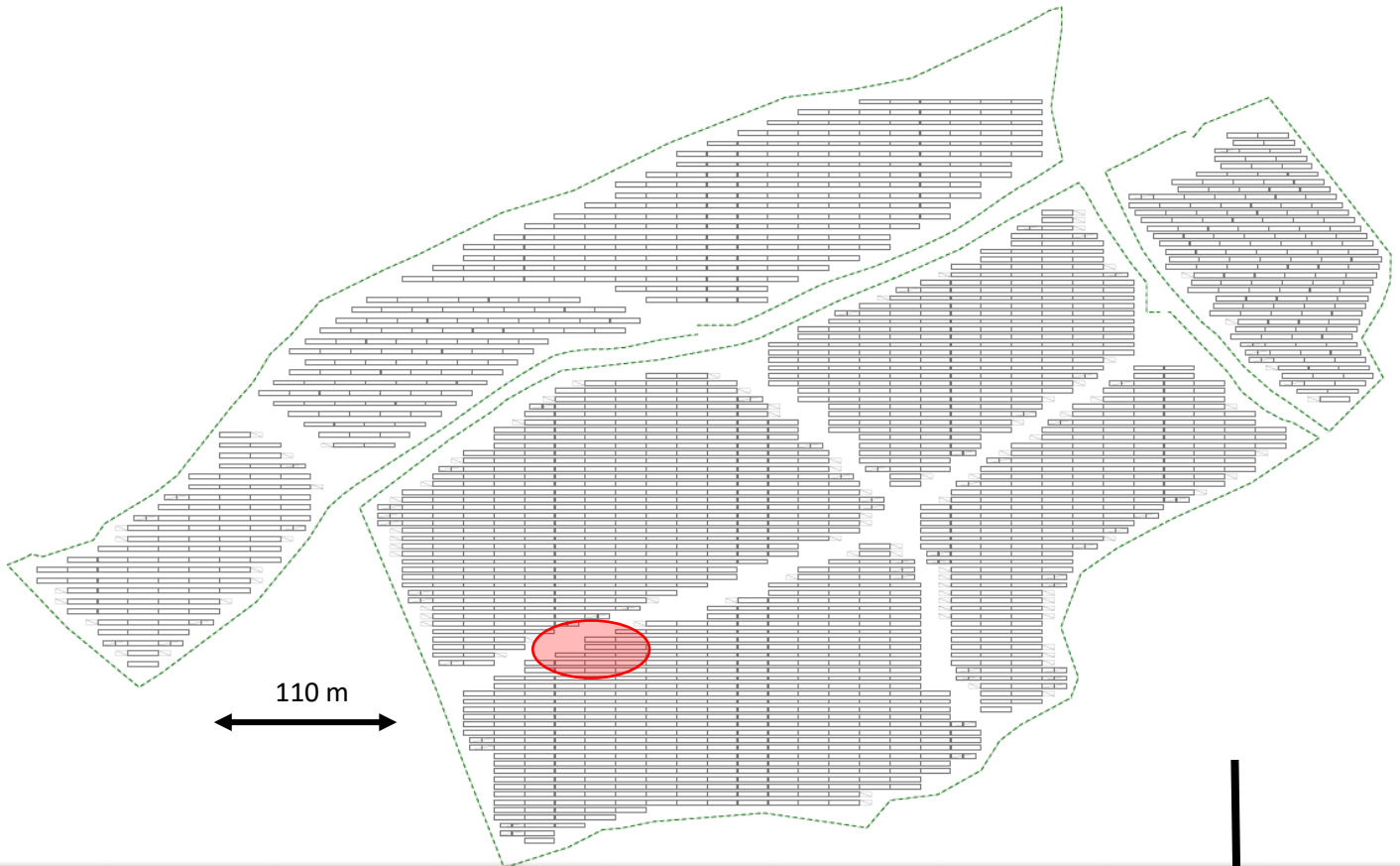
Annexe 2 : Relevé botanique sur le site de Marmanhac par traitement avec le pourcentage de recouvrement dans la zone en exclos ; - : absent des transects ; case grise et gras : présent dans les zones du parc ; Moyenne du recouvrement de 18 quadrats (0,5 x 0,5 m) par traitement

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

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



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



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

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

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

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

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

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

ANNEXE 2 - RAPPORT D'ETUDE SUR LE BIEN-ETRE ANIMAL – CENTRALE SOLAIRE DE CVE A
BISSEY-SOUS-CRUCHAUD (71)

Rapport d'étude sur le bien-être animal – Centrale solaire de CVE à Bissey-sous-Cruchaud

Véronique DEISS, Chargée de Recherches bien-être animal, INRAE



Credit photo : Jaëe RICOL

Etude menée conjointement par Statkraft, CVE et INRAE afin d'évaluer les effets de la présence de panneaux photovoltaïques sur le pâturage ovin pendant une période de deux ans (2022-2023).

Sommaire

• Rapport d'étude sur le bien-être animal - Centrale solaire de CVE à Bissey-sous-Cruchaud(71)

1. ANIMAUX, MATERIEL ET METHODE

- 1.1. Le troupeau
- 1.2. Calendrier d'acquisition des données
- 1.3. Activité des brebis et position à l'ombre ou au soleil
- 1.4. Observation santé
- 1.5. Environnement climatique
- 1.6. Environnement sonore
- 1.7. Quantité et qualité fourragère

2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- 2.1. Activité des brebis et position à l'ombre ou au soleil
- 2.2. Observation santé
- 2.3. Environnement climatique
- 2.4. Environnement sonore
- 2.5. Quantité et qualité fourragère

3. CONCLUSION

4. REFERENCES

Rapport d'étude sur le bien-être animal - Centrale solaire de CVE à Bissey-sous-Cruchaud(71)

Par le passé, quelques études ont mis en évidence des effets bénéfiques de la présence de panneaux photovoltaïques sur la production animale, cependant elles portent sur des périodes relativement courtes de quelques semaines ou mois et n'intègrent pas simultanément tous les principes liés à l'évaluation du bien-être animal, à savoir l'alimentation, le logement, la santé et le comportement.

A titre d'exemples : une étude de 2021 (Alyssa C. Andrew, et al.) montre que le chargement en ovins est plus élevé dans les pâturages sous panneaux solaires (36,6 agneaux/ha) que dans les pâturages ouverts (30 agneaux/ha) à la fin du printemps. Les productions de poids vif entre les pâturages sous panneaux solaires (1,5 kg ha/j) et les pâturages ouverts (1,3 kg ha/d) sont comparables. Cette même étude met en évidence une économie d'eau consommée par les ovins dans les pâtures avec panneaux (- 0,72 l/tête/j d'eau comparées aux pâtures ouvertes), cependant seule une tendance a été relevée le printemps suivant. Lorsque des ovins ont le choix pour s'abriter des rayonnements solaires entre des panneaux photovoltaïques et des toiles bloquant 80% des rayonnements, il a été montré qu'en dessous d'une intensité de 800 W.m⁻², ils passaient 38 % de leur temps sous les panneaux contre moins de 1 % sous toile. Lorsque les rayonnements solaires sont supérieurs à 800 W.m⁻², les ovins passent plus de 70 % de leur temps sous les abris photovoltaïques (Maia et al., 2020). Chez des bovins, Sharpe et al (2020) montrent que la fréquence de respiration des vaches avec et sans ombre de panneaux est similaire le matin, mais l'après-midi, les vaches avec ombre ont des taux de respiration plus faibles (66 respirations/min) que les vaches sans ombre (78 respirations/min). L'après-midi et jusque minuit, les vaches avec ombre des panneaux ont des températures corporelles internes plus faibles que les vaches sans ombre.

La centrale solaire CVE de Bissey-sous-Cruchaud (71) est entretenue depuis sa mise en service en 2021 par éco-pâturage. Le présent projet a pour objectif d'étudier les effets sur du moyen terme, ici 2 années successives, de la présence de panneaux photovoltaïques sur le pâturage ovin (comportement, bien-être animal, santé et production de fourrage disponible).

1. ANIMAUX, MATERIEL ET METHODE

1.1. Le troupeau

Un troupeau de 20 brebis de race Tarasconnaise a été suivi sur une période de 2 ans (2022-2023). Les brebis en plein air intégral ont accès à une parcelle dont la couverture par des panneaux photovoltaïques est d'environ 6 hectares. L'entretien de ces brebis est assuré par l'entreprise d'éco-pâturage : Ecomouton. Le chargement (nombre de brebis/ha/jour) a été estimé par Ecomouton avec pour objectif d'entretenir la centrale sans recours à une tonte mécanique et sans nécessité d'affourager les brebis au cours de l'année.

1.2. Calendrier d'acquisition des données

Campagne de mesure	Date 2022	Intervention	Date 2023	Intervention
0	25-janv.-22	Etat des lieux	20-21avril-23	pose capteurs et observations
1	2-3-mars-22	pose capteurs et observations	27-avril-23	Retrait et observations
	8-9-mars-22	Retrait et observations	14-juin-23	pose capteurs et observations
2	28-29-mars-22	pose capteurs et observations	13-juillet	Retrait et pose capteurs et observations
	6-avr.-22	Retrait et observations	09-août	Retrait et pose capteurs et observations
3	10-11-mai-22	pose capteurs et observations	? Octobre (s44)	retrait
	24-mai-22	Retrait et observations Analyse fourrage		
4	20-juil.-22	pose capteurs et observations		
	28-juil.-22	Retrait et observations		
5	29-nov.-22	pose capteurs et observations		
		Retrait et observation		
Total	35 jours de données capteurs 7 jours d'observation 7 points santé		70 jours de de données capteurs 3 jours d'observation 5 points santé	

1.3. Activité des brebis et position à l'ombre ou au soleil

L'activité debout-couchée des brebis a été acquise en fixant un accéléromètre (Hobo Pendant G acceleration) sur une des pattes arrière de chaque brebis. L'inclinaison moyenne de la patte est enregistrée toutes les minutes. Sur toute la période de l'étude, 105 jours (24h) de données pour 15 brebis sont exploitables (perte de capteurs en cours d'acquisition). Un algorithme (macro Excel) transforme les valeurs d'inclinaison en données binaires (0 : debout, 1 : couchée) avec un seuil d'inclinaison par défaut qui a été ajusté à partir des données acquises via les observations directes.

La position des brebis à l'ombre des panneaux ou au soleil a été déterminée à partir des données acquises par des capteurs-luxmètres (Hobo MX2202) placés au-dessus des brebis entre les 2 épaules. 3 autres capteurs ont été placés en zone nue, en inter-rang et sous un rang de panneaux (voir plan). La luminosité moyenne est enregistrée toutes les minutes. Sur toute la période de l'étude, 100 jours (24h) de données pour 12 brebis sont exploitables (perte de capteurs en cours d'acquisition). Le seuil de position ombre-soleil des brebis est fixé par la différence de luminosité enregistrée sous les panneaux et en inter-rang et a été ajusté à partir des données acquises via les observations directes.

L'activité debout-couchée ainsi que la position ombre-soleil a été acquise également par des observations en direct. Sur une période de 3h, 3 brebis ont été suivies en continu et ces 2 variables ont été enregistrées. Ensuite, sur une période de 1h des scans de 5 minutes ont été réalisés sur toutes les brebis. Ces données permettent

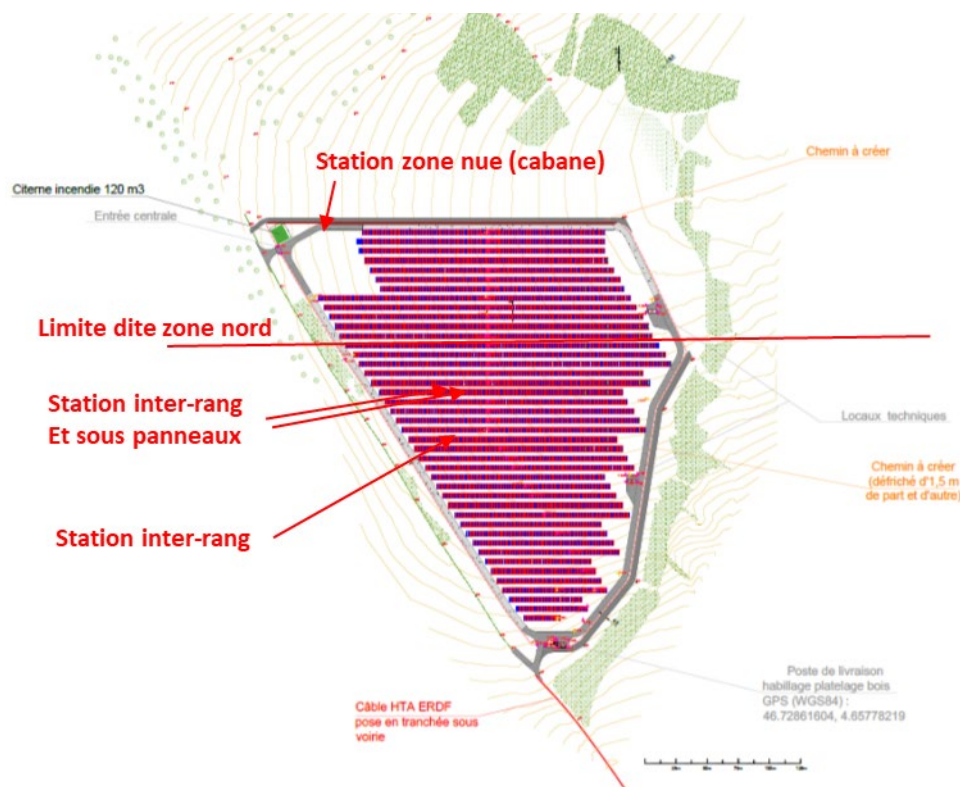
de définir les seuils utilisés dans l'analyse automatique des données acquises par les capteurs (accéléromètres et luxmètres). 10 *4h d'observations ont été réalisées sur toute la période de l'étude.

1.4. Observation santé

Des observations visuelles ont été réalisées pour détecter d'éventuels problèmes de santé. Ces observations concernaient les blessures, la propreté, la présence de parasites externes et les écoulements nasaux (d'après le protocole Awin-ovin). Sur toute la période de l'étude, ces points de santé ont été réalisés 12 fois.

1.5. Environnement climatique

4 stations météorologiques (Besser), enregistrant les moyennes par heure de la température, l'hygrométrie et la vitesse du vent ont été installées dans la centrale à 1 mètre au niveau du sol. 1 station était située en zone nue, 1 sous un rang de panneaux et les 2 autres en inter-rang (voir plan ci-dessous).



D'après schéma Statkraft-CVE

Pour évaluer le niveau de stress thermique des brebis, l'indice de charge thermique ou le « heat load index » (HLI) a été calculé. Cet indice prend en compte non seulement la température mais également l'humidité relative ainsi que la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Le rayonnement solaire a été acquis avec des capteurs-luxmètres (Hobo MX2202) placés à côté des stations météorologiques.

Le HLI est calculé à partir d'un autre indice appelé Tbg (Black Globe Température) ou température du globe noir. Le Tbg est calculé à partir de la formule suivante (Hahn et al. 2003) :

$$Tbg = 1,33 \times TA - 2,65 \times TA^{0,5} + 3,21 \times \log_{10} (Rad + 1) + 3,5$$

avec TA : Température Ambiante en °C et Rad : Rayonnement Solaire en W/m².

Le HLI est ensuite calculé à partir de deux formules en fonction du seuil de Tbg.

$$HLI \text{ si } Tbg > 25^{\circ}C = 8,62 + 0,38 HR + 1,55 Tbg - 0,5 \text{ Vent} + e(2,4 - \text{Vent})$$

$$HLI \text{ si } Tbg < 25^{\circ}C = 10,66 + 0,28 HR + 1,3 Tbg - \text{Vent}$$

avec Vent : Vitesse du vent (m.s⁻¹), R : Humidité Relative (%)

Les seuils de stress utilisés ont été fixés par Gaughan et al., (2008)
HLI < 70 : pas de risque de stress pour les animaux
70 < HLI < 77 : état de stress léger
77 < HLI < 86 : état de stress modéré
HLI > 86 : état de stress marqué

La perception d'un stress thermique perçu par les brebis a également été évalué par des observations en direct. Lors de journées chaudes (températures > 30°C) a été évaluée visuellement la fréquence respiratoire des brebis ainsi que les halètements (respiration bouche ouverte).

1.6. Environnement sonore

Le niveau sonore (dBa) a été enregistré en inter-rang au milieu de la centrale (sonomètre DL161S Voltsoft). 1 mesure a été acquise toutes les secondes en se déplaçant d'un pas régulier (0,8 m/s) depuis la bordure de la centrale jusque l'onduleur (voir plan). Ces mesures ont été réalisées en juin, août et octobre 2023.

1.7. Quantité et qualité fourragère

Pour évaluer la quantité de fourrage disponible sous les panneaux et en inter-rang des zones de défens (diamètre 110 cm) ont été mises en place. 3 zones étaient situées sous les panneaux, 3 autres en inter-rang. Les hauteurs d'herbe dans chacune des zones ont été mesurées en mai et juillet 2022.

En juin 2023, des hauteurs d'herbe ont été mesurées en zones pâturées avec un herbomètre. 100 points de mesure ont été réalisés sous les panneaux, 100 autres en inter-rang et 100 autres à 1 mètre de la partie haute des panneaux (voir schéma, partie résultats).

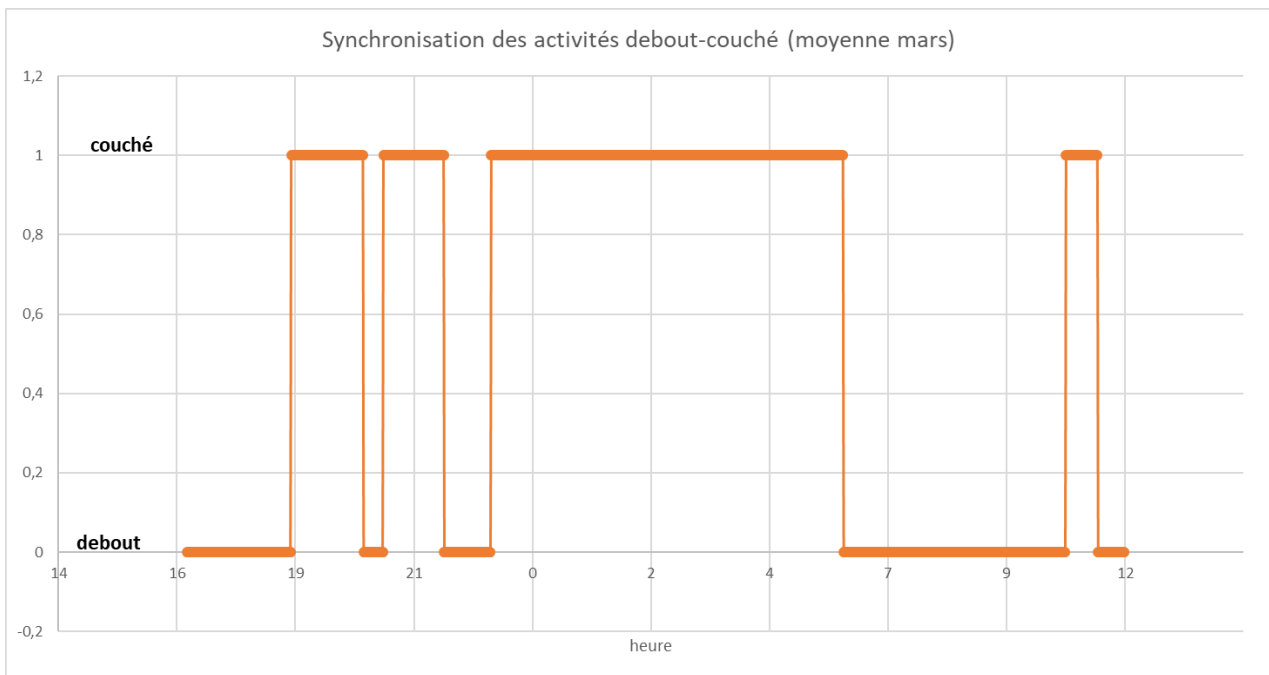
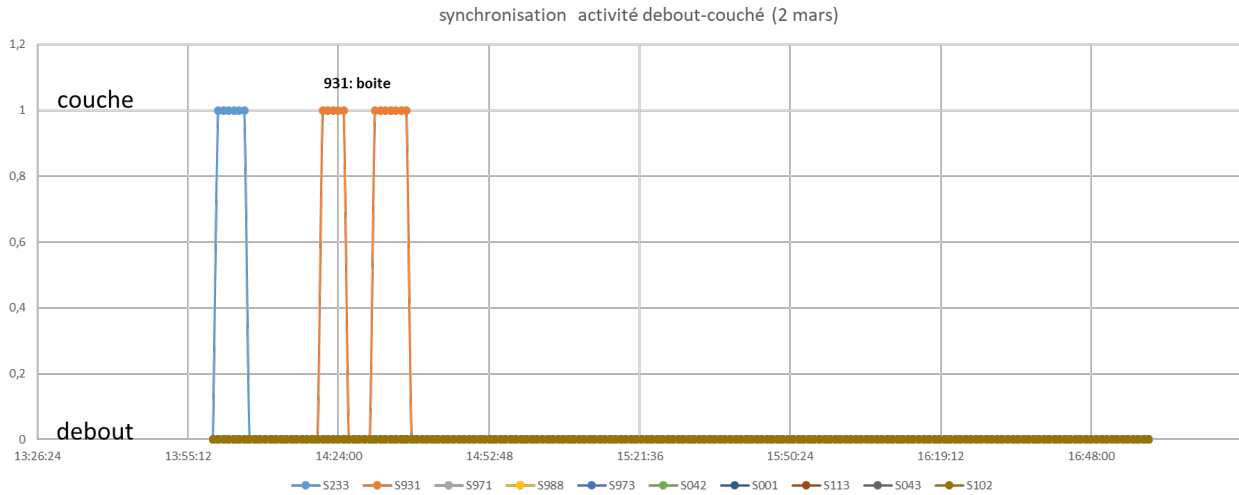
Fin mai 2022, des analyses fourragères ont été réalisées (coopérative Bourgogne du sud) à partir d'échantillons prélevés dans chacune des zones de défens.

2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

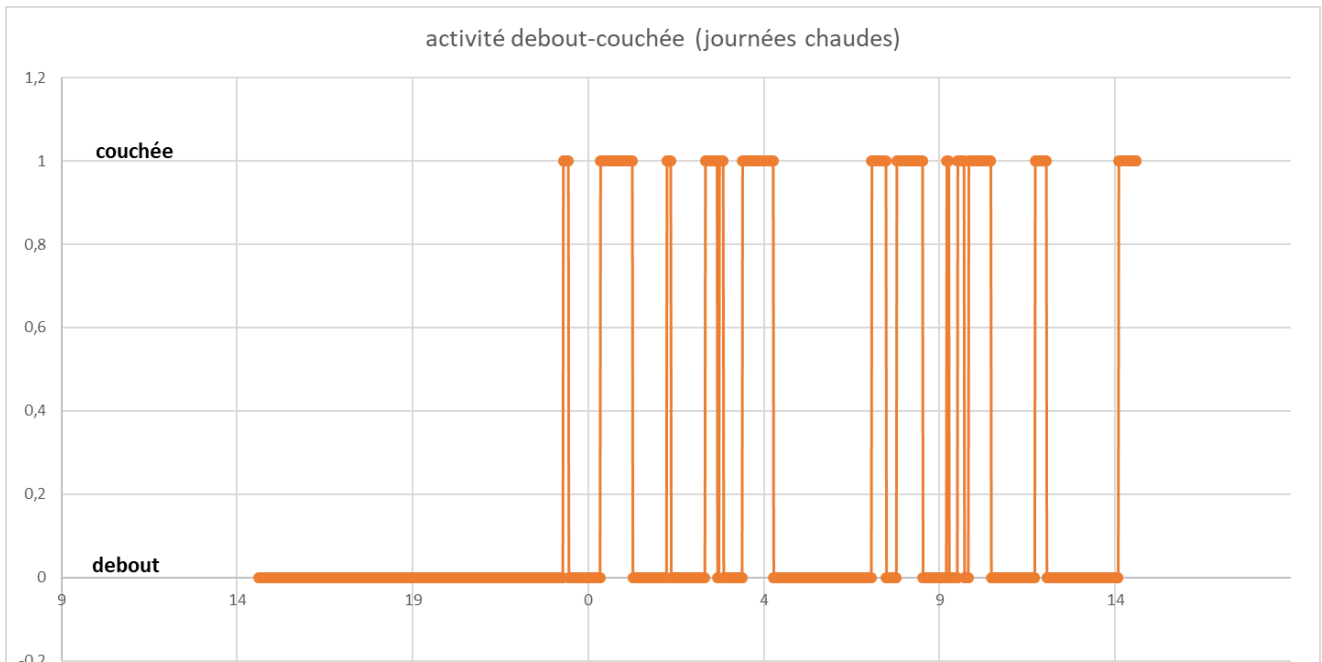
2.1. Activité des brebis et position à l'ombre ou au soleil

Sur toute la période de l'étude, les brebis passent en moyenne 428 min/jour en position couchée et 1012 min/jour debout. Ces données sont en accord avec le cycle circadien des 3*8h qu'effectuent les ruminants, à savoir 8h d'ingestion (position debout), 8h de rumination (position debout et parfois couchée) et 8h de repos (position couchée et parfois debout).

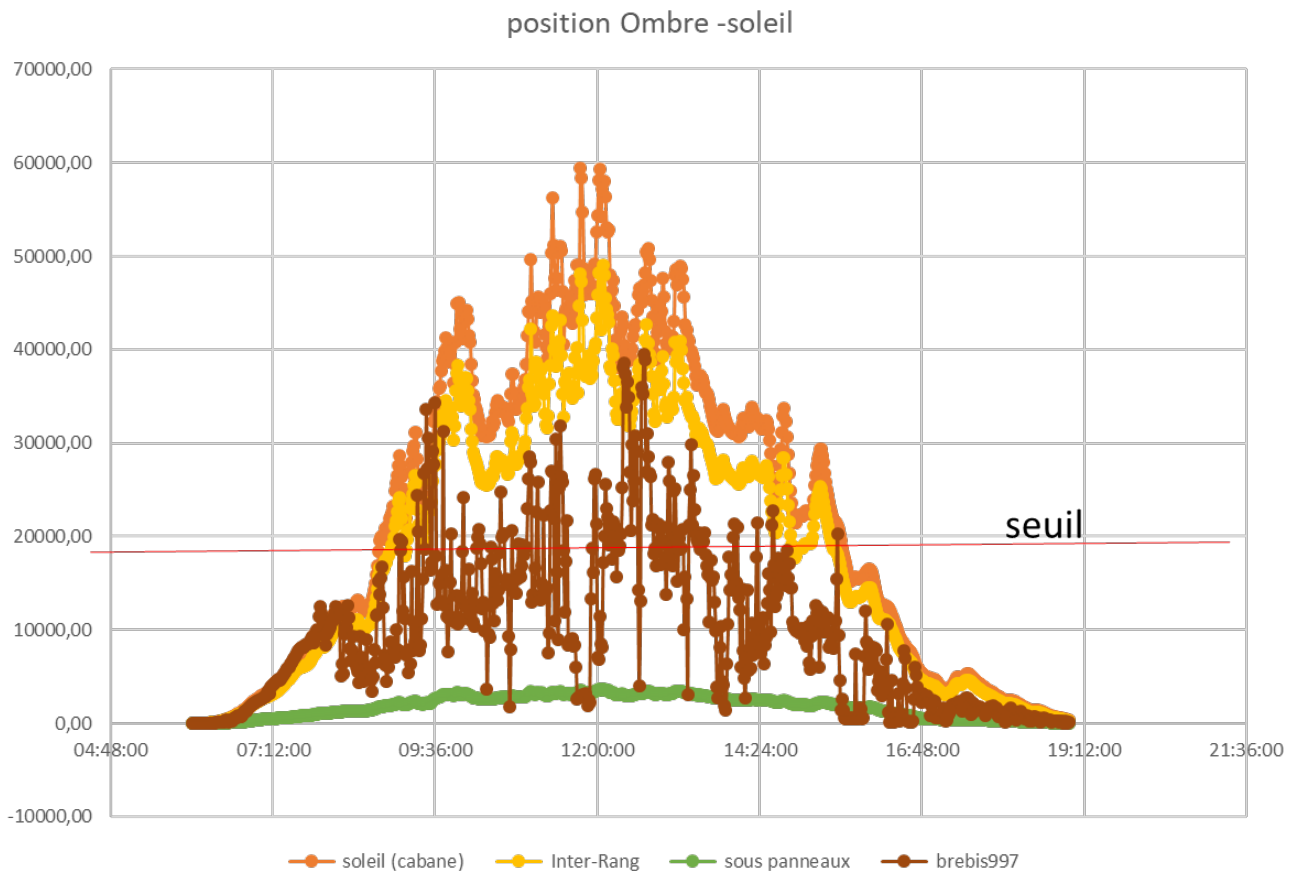
Les 2 graphiques ci-dessous montrent que l'activité (debout-couchée) est synchronisée au niveau du troupeau. Les brebis sont debout vers 6h du matin jusque 19h avec une période de repos, couchée, vers 11H. Les observations comportementales montrent que pendant cette période les brebis pâturent ou ruminent. De 23h à 6h les brebis sont couchées au repos. Seule une brebis (n° 931) est désynchronisée dans la journée par rapport au troupeau. Cette brebis présentait une boiterie, ce qui peut expliquer ce comportement. La douleur induite par une boiterie oblige l'animal à changer plus souvent de position qu'un animal sans douleur.



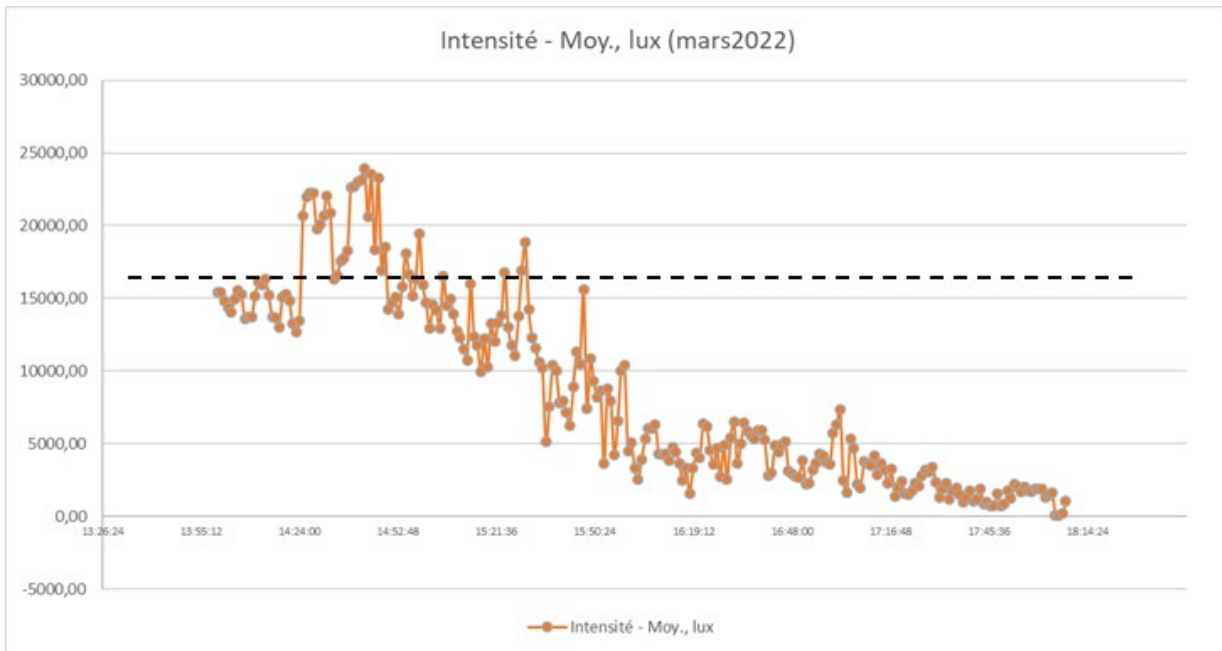
Lors des journées chaudes (ci-dessous fin mai 2022, période particulièrement chaude), les brebis sont en position debout plus tôt le matin (5h) et couchées plus tard (23h). Leur activité debout-couchée est plus alternée qu'en période moins chaude mais reste synchronisée au niveau du troupeau.



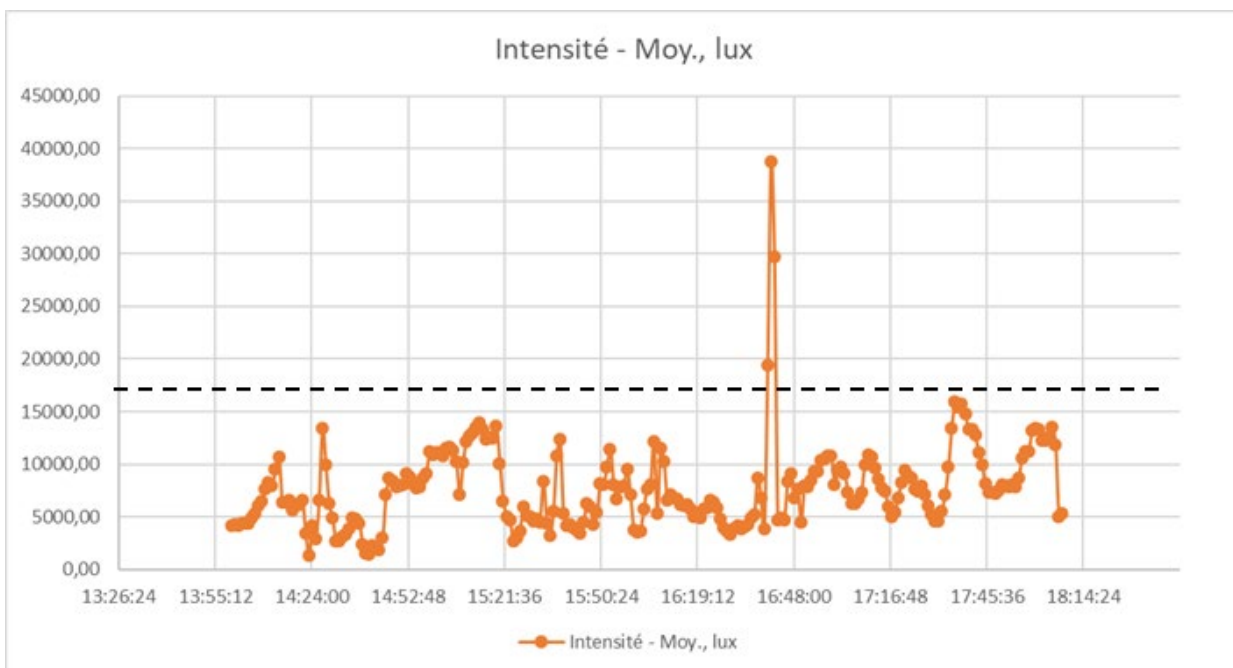
Les observations comportementales (position zone nue ou sous panneaux) ont permis de définir un seuil de luminosité enregistré par les capteurs fixés sur les brebis qui est de 17 000 lux au-dessus de la valeur enregistrée par le capteur positionné sous les panneaux. Cette différence est liée au fait que le capteur posé sur les brebis n'a pas un angle fixe, il varie avec la position des brebis contrairement au capteur positionné sous les panneaux.



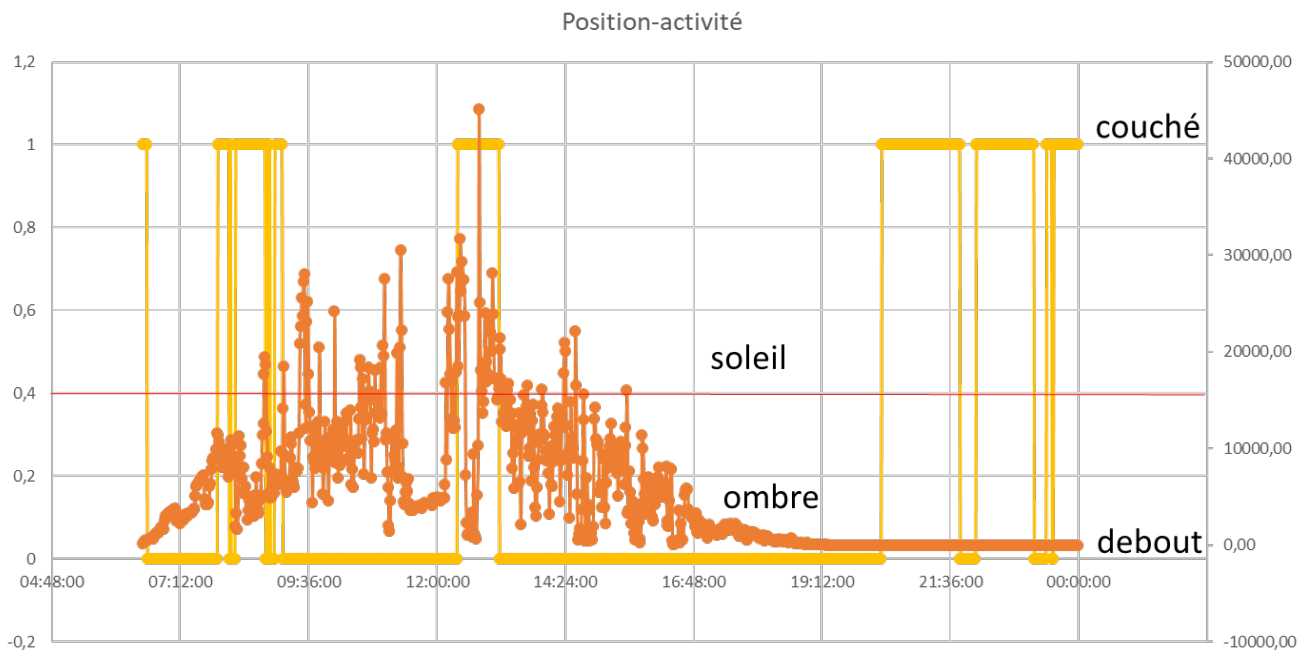
En dessous de 9 000 lux en extérieur, les capteurs de luminosité ne sont pas suffisamment précis pour déterminer la position des brebis en zone nue ou sous les panneaux, c'est-à-dire avant 9h du matin et après 16h en moyenne.



En Mars 2022 (graphique ci-dessus), les brebis dans l'après-midi sont en zone nue. En revanche, en juillet 2023 (graphique ci-dessous) elles restent l'après-midi à l'ombre sous les panneaux.



Sur 90 jours d'acquisition de données (perte de capteurs), il a été possible de coupler les données acquises par les podomètres et les luxmètres. En début de printemps et en automne, il n'y a pas d'activité debout-couchée associée à une position ombre-soleil. En revanche, en fin de printemps et en été (graphique ci-dessous) l'activité debout, incluant l'activité ingestion est associée à une position à l'ombre.



2.2. Observation santé



photo AWIN

Fin printemps 2022, lors de 2 relevés successifs, 8 brebis présentaient un écoulement nasal de niveau 2. 2 brebis lors de cette même période présentaient des boiteries avec un raccourcissement de la foulée et des hochements de tête ou coup de tête (*head flicking*) lorsque le membre (ici postérieur) atteint touchait le sol.

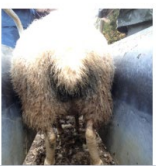
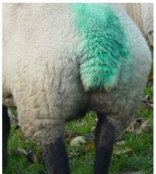
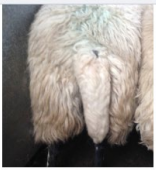
Aucune blessure n'a été relevée sur les brebis. Cependant en 2022, suite au regroupement du troupeau, une brebis a été gravement blessée avec déchirure de la peau et des muscles au niveau des épaules qui a nécessité l'intervention d'une vétérinaire, une anesthésie locale, une suture, un traitement antibiotique et le retrait de cette brebis de la centrale (retrait chez la bergère d'Ecomouton).

Fin printemps 2022, lors d'un relevé santé, les brebis étaient infestées par des tiques (5 à 6 /brebis). Les tiques n'étaient pas présentes lors du relevé santé suivant.

En 2022, 1 brebis a été retrouvée morte sur la centrale. La brebis n'ayant pas été autopsiée aucune explication ne peut être mise en avant.

En 2023, 2 brebis présentaient un abcès au niveau du cou dont l'origine pourrait être une coupure lors de la tonte qui a été effectuée quelques jours avant l'observation.

Concernant la propreté : La salissure fécale est la présence de matières fécales sur la laine autour de l'anus, du siège, de la queue et des postérieurs. Les boudins sont des amas de matières fécales qui pendent de la laine. Elles sont associées à la diarrhée, qui peut résulter d'une infestation par des endoparasites ou d'un déséquilibre nutritionnel, et constituent un facteur de risque pour la myiase cutanée ou la maladie de la mouche.



Score 0, 1,2 (Awin)

0 : Pas de souillure fécale : la laine autour de la région du siège et sous la queue est propre.

1 : Une petite quantité de matières fécales dans la laine autour de l'anus.

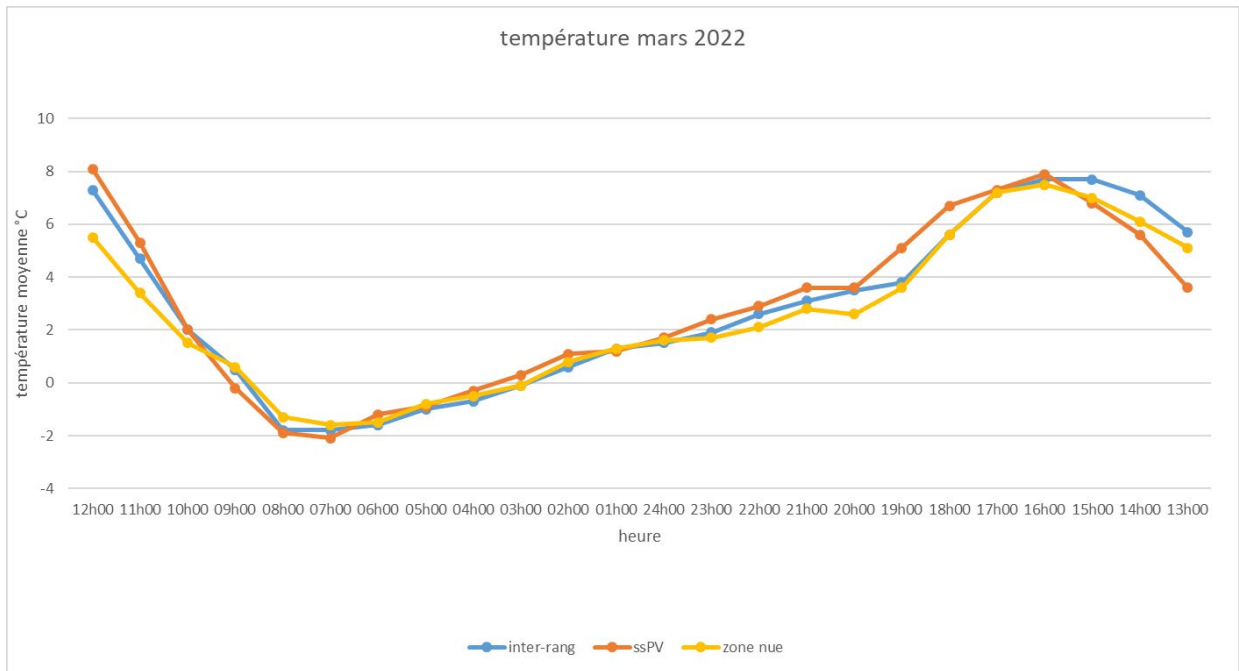
2 : Quelques salissures autour de l'anus et des boudins (zones matelassées de matières fécales adhérant à la laine) dans cette zone uniquement.

Sur toute la période de l'étude, les scores observés se situaient entre 1 et 2. Aucune diarrhée n'a été observée aussi bien par l'observation de la propreté des brebis que par la consistance des fécès.

2.3. Environnement climatique

En fin d'hiver 2022 (mars) de 21h à 10h il n'y a pas de différence significative entre les températures enregistrées en inter-rang et en zone nue.

Au cours de la nuit (18h à 6h) les températures, en cumulé, sous panneaux sont légèrement supérieures à celles enregistrées en inter-rang et en zone nue. De 10h à 12h les températures sous panneaux sont supérieures à celles enregistrées en zone nue puis il y a une inversion en début d'après-midi.



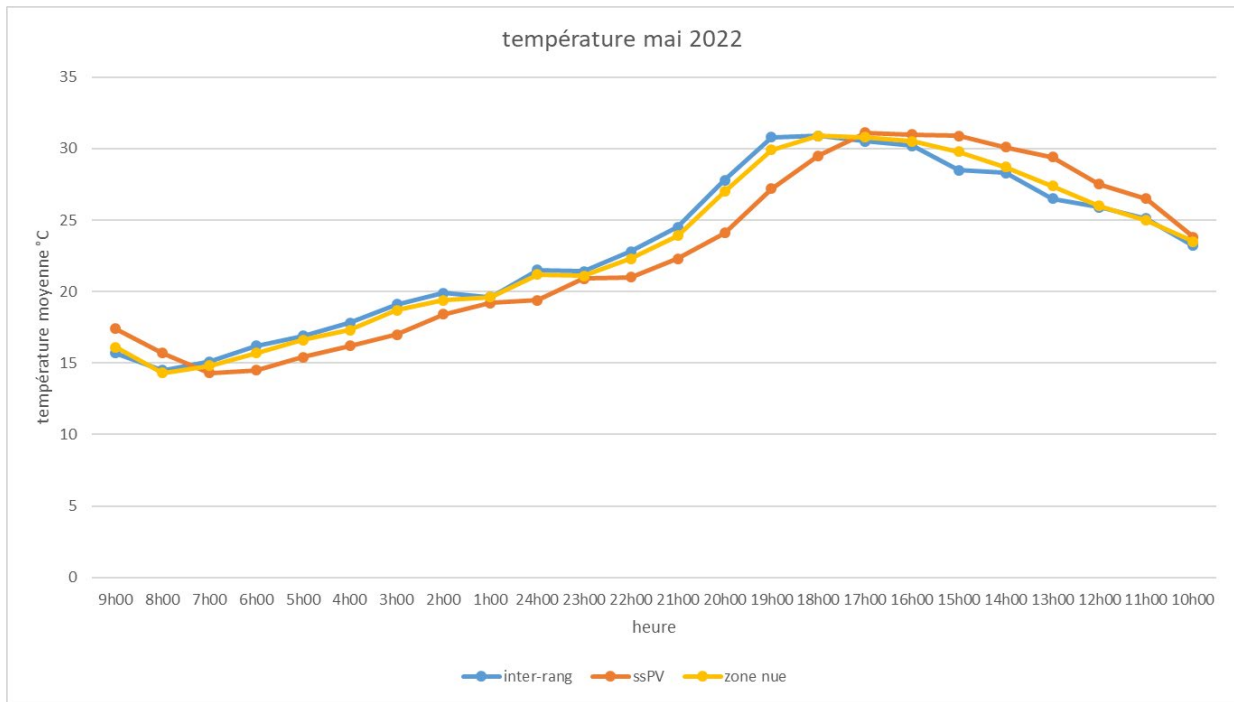
Moyenne des températures horaires sur les 10^{ers} jours du mois de mars 2022 (Remarque : Les données enregistrées au niveau des 2 stations en inter-rang, n'étant pas significativement différentes, ont été moyennées.)

De manière ponctuelle, il a été noté qu'en fin d'hiver au matin vers 8h le sol était couvert de gelées blanches en inter-rang mais pas sous les panneaux, même s'ils étaient encore à l'ombre.



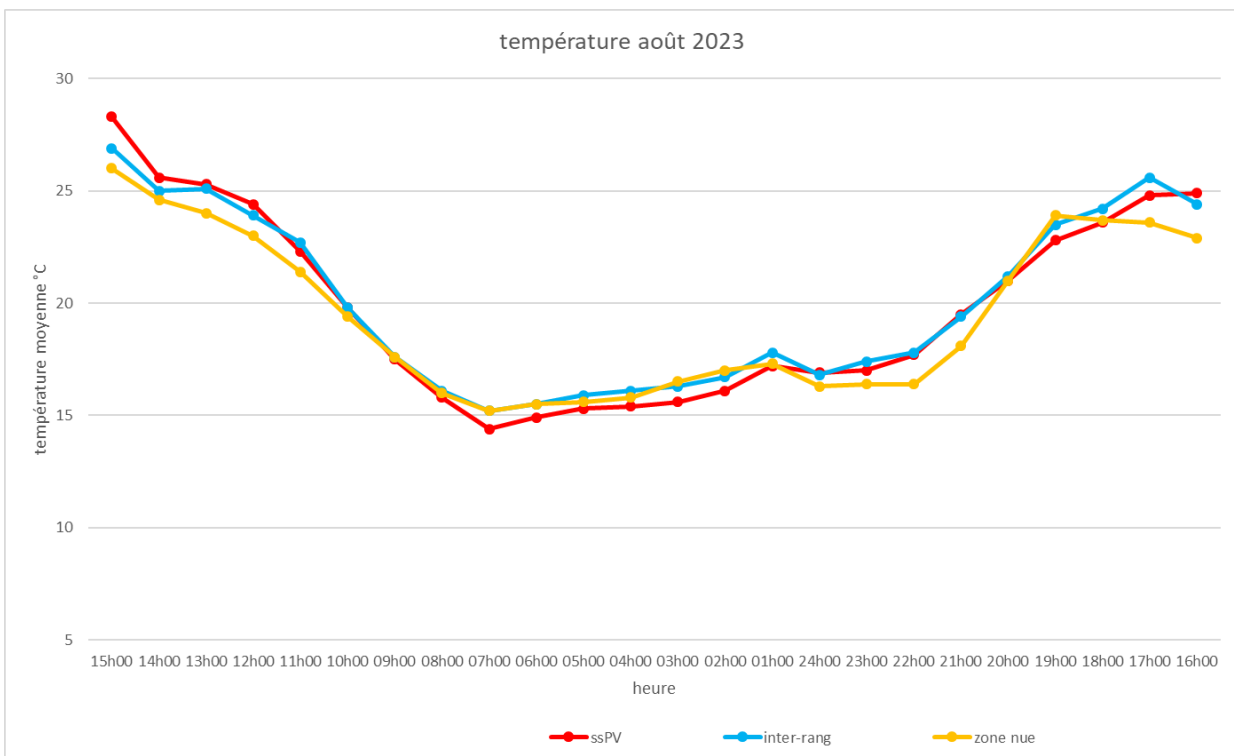
Les températures cumulées plus élevées au cours de la nuit sous les panneaux qu'en inter-rang peuvent expliquer l'absence de gelées sous les panneaux en fin d'hiver.

En mai 2022 les températures en inter-rang et en zone nue ne sont jamais significativement différentes. Au cours de la nuit, les températures sous les panneaux sont plus basses que celles en inter-rang et zone nue. Il y a une inversion entre 11h et 15h, période pendant laquelle les températures sous panneaux sont plus élevées qu'ailleurs dans la centrale.



Moyenne des températures horaires sur les 10^{ers} jours du mois de mai 2022

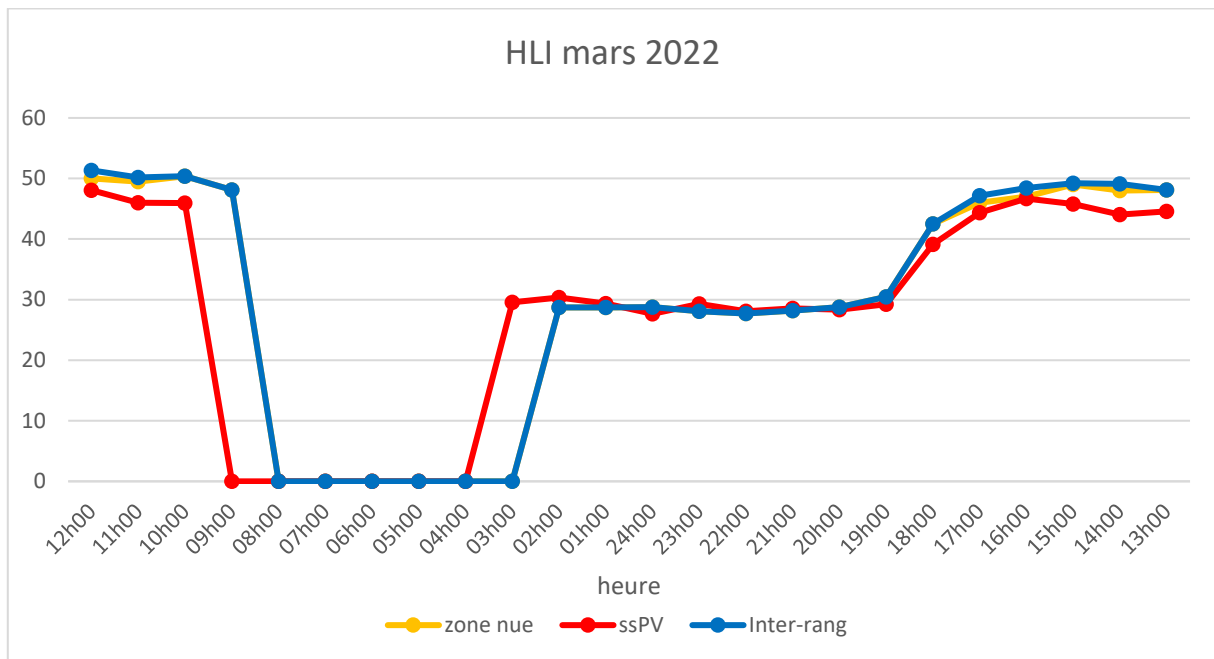
En août 2023, il n'y a pas de différence significative entre les températures sous panneaux et en inter-rang. Les températures en cumulé sont plus basses en zone nue de 11H et 23h que sous les panneaux et en inter-rang.



Moyenne des températures horaires sur les 10^{ers} jours du mois d'août 2023

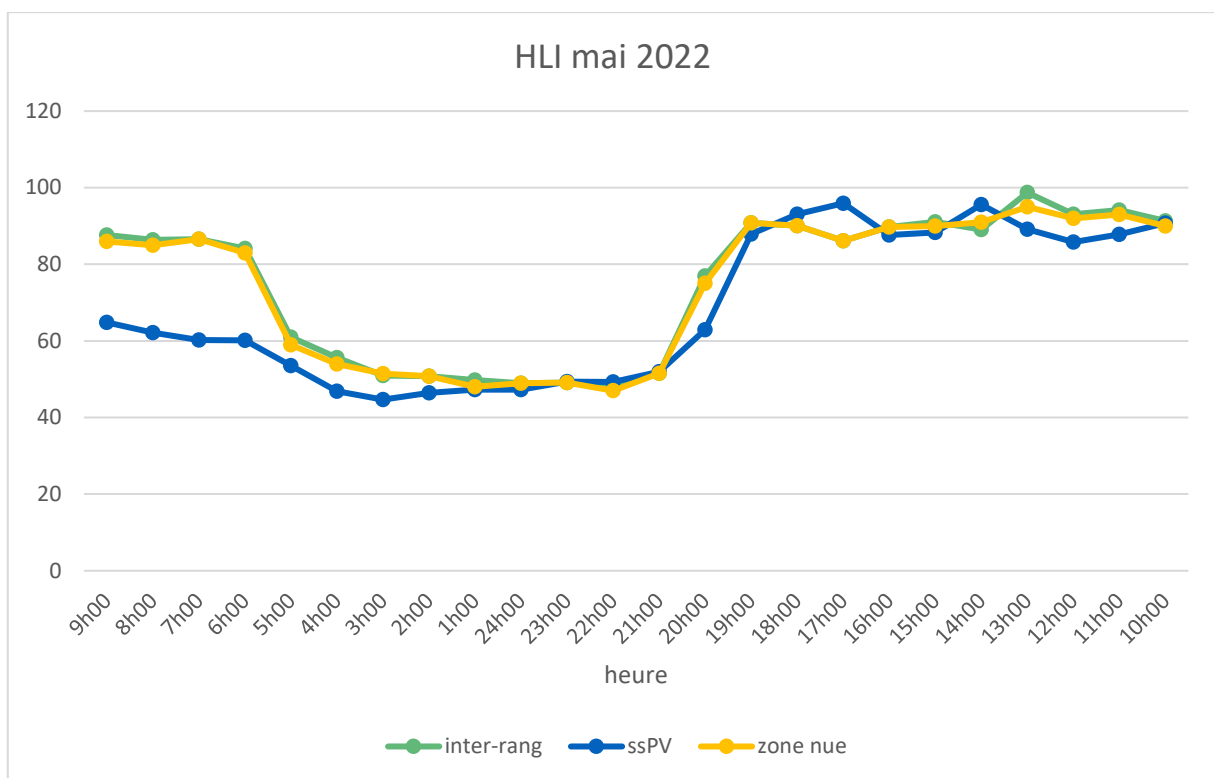
Les 3 graphiques suivants représentent le ressenti thermique perçu par les brebis (HLI). Bien que la température sous les panneaux ait été parfois plus élevée que dans les autres zones de la centrale, les HLI sous les panneaux sont eux toujours inférieurs. Les moindres niveaux de radiations solaires sous les panneaux expliquent ces plus faibles valeurs de HLI. En mai (17h), il a cependant été enregistré un HLI sous panneaux

supérieur à celui des autres zones de la centrale, ce résultat s'explique par une absence de vent sous les panneaux lors de ce point de mesure.



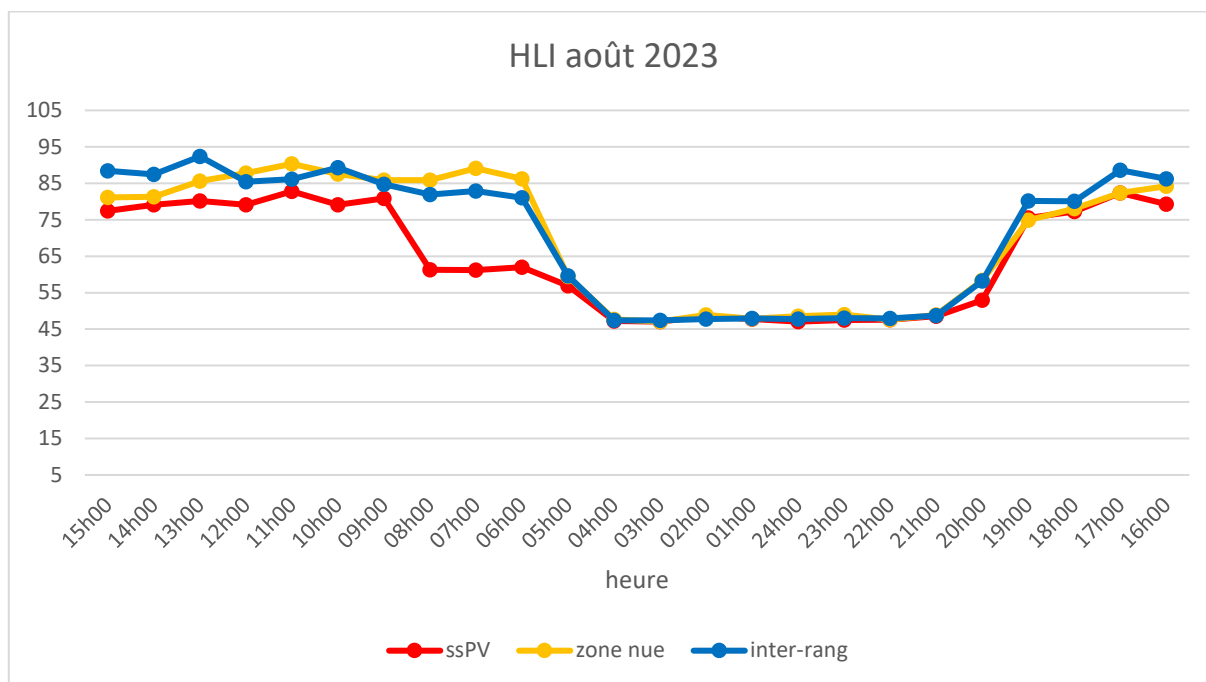
Moyenne des HLI horaires les 10^{ers} jours du mois de mars (HLI=0 signifie que les températures étaient négatives)

En mai de 10h à 19h le HLI indique un stress marqué quel que soit le lieu de la centrale. De 6h à 9h le HLI indique une absence de stress thermique sous les panneaux alors que les autres lieux de la centrale induisent un stress modéré.



Moyenne des HLI horaires les 10^{ers} jours du mois de mai

En août, de 10h à 17h le HLI indique un état de stress marqué en inter-rang ou en zone nue, alors que sous les panneaux le stade de stress modéré n'est jamais dépassé.



Moyenne des HLI horaires les 10^{ers} jours du mois d'août

Lors de 4 journées chaudes (>30°C en zone nue), il a été évalué visuellement la fréquence respiratoire de 4 brebis sur un période de 2h. La moyenne était de 53 battements/minute, les brebis étaient toujours sous les panneaux. D'après les scores Awin (ci-dessous), les brebis étaient en stress thermique élevé, cependant dans une autre étude (projet Parasol, données personnelles), dans des conditions climatiques similaires les brebis en zone nue avaient des fréquences respiratoires de 70 battements/minutes. De même sur la centrale lorsque les brebis étaient dans l'abris après la pose des capteurs leurs battements étaient de 80/minutes (le stress de la contention a pu augmenter la fréquence respiratoire des brebis).



Normal : Les respirations se font à un rythme normal (environ 20 respirations par minute), la bouche étant fermée.



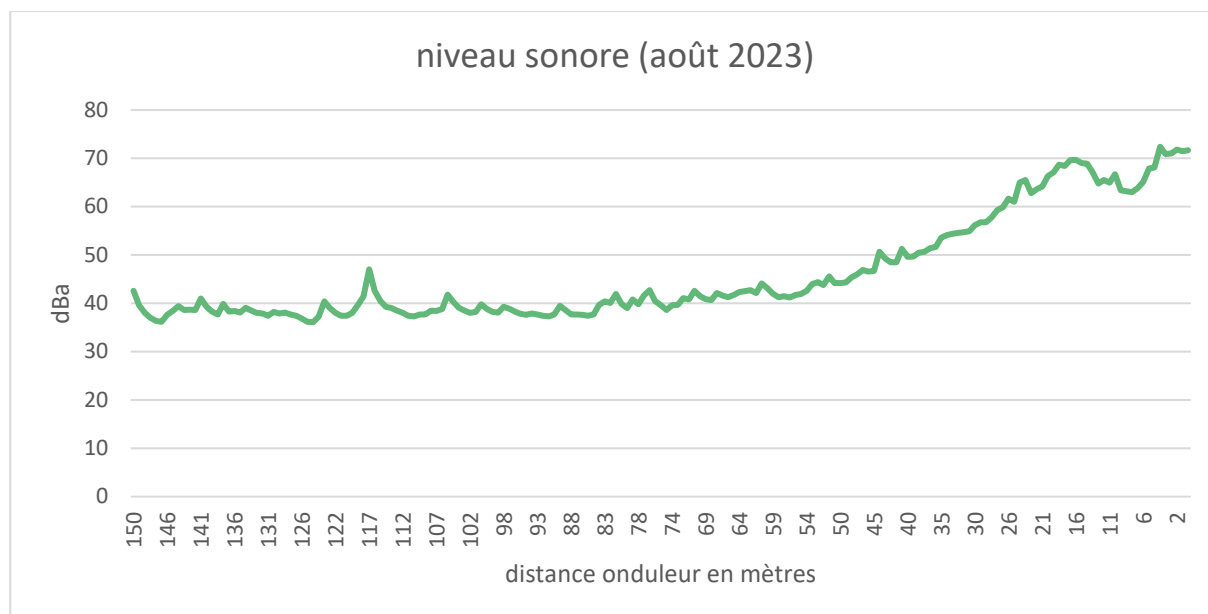
Stress moyen : La fréquence respiratoire est supérieure à 30 respirations par minute mais inférieure à 40 et la respiration se fait la bouche fermée.



Halètement, stress élevé : La fréquence respiratoire est supérieure à 40 respirations par minute et/ou se produit avec la bouche ouverte.

2.4. Environnement sonore

Le niveau sonore, lorsque les panneaux étaient en activité, augmentait graduellement en dBa entre la bordure de la centrale et les onduleurs situés en milieu de rang des panneaux.



Ambiance sonore enregistrée en inter-rang en août 2023 à 13h de la bordure de la centrale à l'onduleur

En juin 2023 à 13h le niveau sonore enregistré à 1 mètre de l'onduleur s'élevait à 71 dBa, en août, il était de 72,4 dBa et en octobre de 61,5 dBa.

Lors des observations comportementales, les brebis n'ont jamais été observées à proximité des onduleurs en pleine activité. Cependant les zones proches des onduleurs sont pâturées. Il est probable que ces zones soient fréquentées par les brebis pendant des périodes peu ensoleillées et de faible activité des panneaux et des onduleurs.

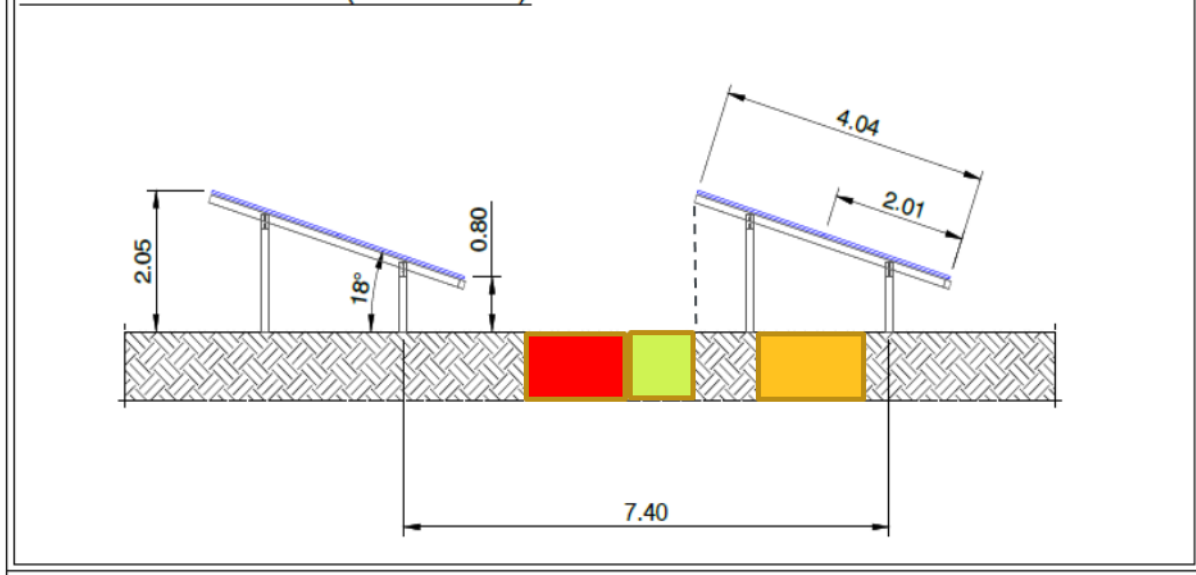
2.5. Quantité et qualité fourragère

Il y a une très grande variabilité dans la quantité d'herbe disponible entre le nord et le sud de la centrale. La partie nord étant moins propice à la pousse d'herbe que la partie sud, aussi bien en inter-rang que sous les panneaux. Des observations visuelles ponctuelles ont estimées dans cette zone nord des hauteurs d'herbe qui ne dépassaient pas les 5 cm de hauteur tout au long de la période de l'étude.

Les zones de défens ont été placées dans la partie sud de la centrale. La hauteur d'herbe sous panneaux est supérieure à celle en inter-rang. En mai 2022, la hauteur d'herbe moyenne dans les 2 zones de défens sous panneaux était de 12 cm contre 10 cm dans les 2 zones en inter-rang. En juillet 2022, la hauteur d'herbe moyenne dans les 2 zones de défens sous panneaux était de 6 cm contre 3 cm dans les 2 zones en inter-rang.

Les mesures de hauteur d'herbe effectuées en juin 2023 dans les zones pâturées montrent un gradient entre l'inter-rang et sous les panneaux (vois schéma ci-dessous). La moyenne des hauteurs en inter-rang était de 2cm (zone en rouge), de 3 cm sous les panneaux (zone en orange) et de 7cm à 1m de la partie haute des panneaux (zone en vert).

Tables de modules (Ech 1:100)



(d'après schéma Statkraft-CVE)

Le tableau ci-dessous résume les données d'analyse fourragère réalisée sur des prélèvements en inter-rang et sous les panneaux. Les teneurs en matière sèche sont plus élevées en inter-rang que sous les panneaux. Cependant les valeurs de taux de cellulose, Adf et Ndf sont plus élevées dans les prélèvements en inter-rang ce qui indique un fourrage plus fibreux, moins consommé par les animaux lorsqu'ils ont le choix et avec une moins bonne digestibilité (Alimentation des ruminants INRA 2028). Les prélèvements sous panneaux sont plus riches en protéines et matière grasse azotée. Les dMO sont légèrement plus élevées dans les prélèvements effectués sous panneaux ce qui traduit une meilleure valeur alimentaire de ses fourrages.

	zone 1 interR	zone 5 interR	zone3 interR	zone2 sspanneaux	zone4 sspanneaux	zone6 sspanneaux	
Matière sèche g/KG MB	354	384	375	193	133	169	
protéines g/kg MS	108	97	86	197	173	175	
Mat grasse azotée g/kg MS	19	13	10	28	24	25	
cellulose g/kg MS	289	321	339	275	275	276	
Adf g/kg MS	319	342	373	335	335	314	
Ndf g/kg MS	600	670	695	587	600	620	moins bonne digestibilité pour valeur hte
dMO	69	65	61	67	66	70	meilleure valeur alimentaire si élevée

3. CONCLUSION

Cette étude, dont l'originalité, par rapport à la bibliographie existante, est d'avoir été menée sur une période de 2 ans apporte des conclusions importantes de l'impact de la présence de panneaux photovoltaïques sur le comportement et le bien être des ovins pâturant dans une centrale photovoltaïque.

Les données acquises par les podomètres posés sur les brebis et les observations comportementales montrent que **le pâturage sous-panneaux ne modifie pas le budget temps des brebis**, elles restent sur un temps de

partage d'activité du 3*8 classique chez les ruminants. **Le pâturage dans cette centrale photovoltaïque ne modifie pas la synchronisation du troupeau**, les brebis sont regroupées, aucune brebis n'est isolée du troupeau et elles sont debout ou couchées aux mêmes périodes.

La présence de panneaux, même si elle n'évite pas lors de périodes très chaudes un ressenti par les brebis d'un stress thermique, limite l'intensité ressentie de ce stress thermique. L'indice de charge thermique (HLI) est inférieur sous les panneaux, comparé aux zones nues. Les panneaux sont des zones d'abri pour les brebis lors des périodes chaudes. Les données des luxmètres indiquent que les brebis s'abritent sous les panneaux lors de périodes chaudes et les observations comportementales montrent que sous les panneaux, les brebis ont des réactions de stress thermique (rythme respiratoire et halètement) atténuées comparées à des données obtenues en zones sans ombre.

La santé des brebis dans cette étude concernant la présence de parasites, d'anémie ou de propreté n'est pas affectée par la présence des panneaux photovoltaïques. Un impact important de la présence des panneaux a été observé sur les blessures. Cet impact négatif peut cependant s'expliquer par une pratique en début d'étude inadaptée. En effet en début d'étude, les brebis étaient regroupées pour effectuer des soins (parage, tonte ...) et la pose des capteurs en utilisant des chiens. Cette pratique a induit du stress chez les brebis, des comportements de fuite et occasionnée des blessures, parfois graves. A partir de fin 2022, la centrale a été divisée en plusieurs zones via du grillage et les brebis étaient regroupées en les attirant avec des compléments alimentaires, **pratique bien moins stressante pour les brebis et qui n'a induit aucune blessure.**

L'utilisation de chien pour regrouper des brebis dans une centrale photovoltaïque n'est pas conseillée d'après cette étude, cette pratique stresse les brebis et est un risque important de blessures sur les panneaux et de plus il semble que les chiens dans cet environnement comprenant de nombreuses structures-soutiens de panneaux ne sachent pas comment adapter leur comportement pour regrouper les brebis. **Il serait préférable dans les centrales de réduire le nombre de supports, de limiter les supports saillants et de prévoir une hauteur minimale de 80-90cm de haut ainsi que de diviser le parc en plusieurs zones et de prévoir une zone sans panneau en milieu de rangée.**

Le fonctionnement des panneaux photovoltaïques induit au niveau des onduleurs des niveaux sonores (70dBa) qui pourraient induire du stress chez les brebis. Des études bibliographiques montrent **que les ovins s'habituent à ces niveaux sonores** (Weeks 2008) mais ces études sont réalisées sur du court terme. **Dans la centrale étudiée de plus de 6 Ha, les brebis ont le choix d'éviter ces zones bruyantes** ce qui pourrait limiter le stress induit par cette ambiance sonore, cependant il pourrait être pertinent d'approfondir ces éventuels effets ou d'atténuer ce niveau sonore en isolant les onduleurs ou peut-être les placer en bout de rang.

Cette étude montre que la quantité de fourrage disponible (hauteur d'herbe) est plus importante sous les panneaux, et même plus importante au bord des panneaux par rapport à l'inter rang. Les taux de matières sèches sont moindres sous les panneaux. Cependant, la qualité du fourrage sous les panneaux est plus élevée qu'en inter-rang.

La présence des panneaux semble aussi limiter l'impact des gelées tardives et donc éventuellement protéger le fourrage disponible dans ces périodes. L'étude ici porte principalement sur l'impact de la présence de panneaux pour lutter contre le stress thermique en périodes chaudes, mais **la présence de panneaux pourrait aussi limiter le stress thermique en périodes froides, limiter les effets du vent au cours de ces périodes et ainsi allonger la durée de pâturage en améliorant le confort thermique des animaux et la disponibilité de fourrages.**

4. REFERENCES

- Alyssa C. Andrew, et al. 2021. Pasture Production and Lamb Growth in Agrivoltaic System. AIP Conf. Proc. 2361, 060001.
- Awin, 2015, welfare assessment protocol for sheep
- Hahn et al. 2003. Perspective on development of thermal indices for animal studies and management in Interaction between climate and animal production
- Maia et al., 2020. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. Journal of Cleaner Production. Volume 258,
- Sharpe KT et al. 2020. Evaluation of solar photovoltaic systems to shade cows in a pasture-based dairy herd. Journal of Dairy Science,
- Weeks 2008. A review of welfare in cattle, sheep and pig lairages, with emphasis on stocking rates, ventilation and noise. Animal welfare