

NEOEN

1 bis Mail Pablo Picasso
4000 Nantes



*Modélisations
OPTISOLEO - Neoen

Bierné-les-Villages
(53)*

Document produit par Ter-Qualitechs



5 Allée de la Planche Fagline
PA de la Teillais
35740 PACE
02 99 23 15 25

10 octobre 2025

Table des matières

Table des matières.....	2
1. Présentation	3
1.1. Modélisation réalisée	3
1.2. Prise en compte du type de culture.....	3
1.3. Données de sol	4
1.4. Données météorologiques	6
1.5. Les zones agrivoltaïques	6
2. Irradiance sur la parcelle agrivoltaïque	7
3. Bilan hydrique.....	8
4. Stress thermique	9
5. Indicateur de bien-être animal.....	10
6. Productivité de la prairie	11
6.1. Production annuelle	11
6.2. Dynamique de pousse sur l'année	12
7. Bilan.....	13
Bibliographie.....	15
Glossaire	16
Table des figures	17
Table des tableaux	17

1. Présentation

Le logiciel OPTISOLEO, développé par la société AGRISOLEO, permet d'étudier des technologies spécifiques pour l'agrivoltaïsme en simulant le microclimat, les rendements agricoles et électriques pour l'optimisation de la synergie des productions agricoles et électriques. Les simulations sont réalisées grâce à des modélisations, mises au point par AGRISOLEO et issues de données bibliographiques.

La modélisation OPTISOLEO sur le projet agrivoltaïque de Bierné-les-Villages permet d'envisager l'influence de l'implantation des panneaux sur la production de la prairie pâturée.

1.1. Modélisation réalisée

Cette simulation prend en compte la structure de l'installation photovoltaïque. La structure choisie est une structure fixe, orientée sud. L'écartement inter-rang est de 7,6m. L'inclinaison des tables est de 18° et leur largeur est d'environ 4,7m. La structure des panneaux, mise en place par Neoen est présentée en Figure 1.

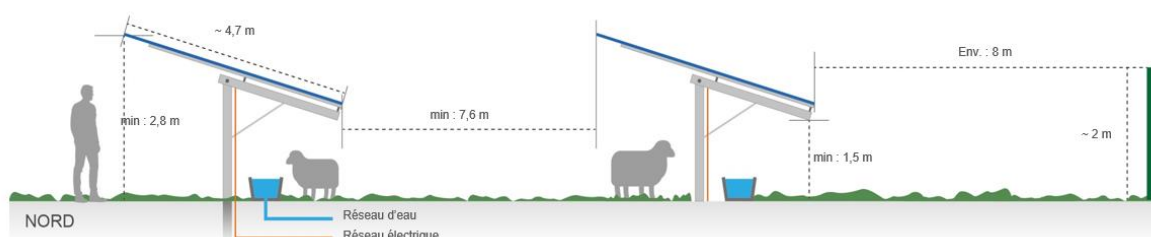


Figure 1 – Dimensions types des structures fixes mises en place par Neoen

1.2. Prise en compte du type de culture

Le logiciel permet d'étudier l'impact des structures agrivoltaïques sur le microclimat des cultures. L'élaboration du rendement des cultures est étudié par stade phénologique, puisque la plante n'a pas les mêmes besoins lumineux ou sensibilités climatiques en fonction de son stade de développement.

La simulation présentée dans ce document étudie une prairie pâturée, composée à 60% de ray-grass, 20% de fétuque, 10% de dactyle et 10% de trèfle.

Les différents stades de développement sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Définition des différents stades de la prairie pris en compte par le modèle

Stade	Date	Hauteur d'herbe
Démarrage de la pousse	01/02 à 24/03	10 cm
1 ^{ère} Mise à l'herbe	25/03 à 19/04	25 cm
Période de repousse 1	20/04 à 04/06	10 cm
2 ^{ème} Mise à l'herbe	05/06 à 19/06	25 cm
Période de repousse 2	20/06 à 19/07	10 cm
3 ^{ème} Mise à l'herbe	20/07 à 04/08	20 cm
Période de repousse 3	05/08 à 03/09	10 cm
4 ^{ème} Mise à l'herbe (ou coupe)	04/09 à 27/10	30 cm
Période de repousse 4	28/10 à 31/12	10 cm

1.3.Données de sol

Les données de sol prises en compte sont celles issues d'une étude agro-pédologique de la parcelle, réalisée par Ter-Qualitechs en septembre 2024.

Des sondages ont été effectués sur chacune des parties est et ouest du site agrivoltaïque, par le biais de fosses pédologiques ou de sondages tarières. L'emplacement de ces différents sondages est présenté dans la Figure 2 et la Figure 3 (pour plus de précisions, se référer à l'étude agro-pédologique).

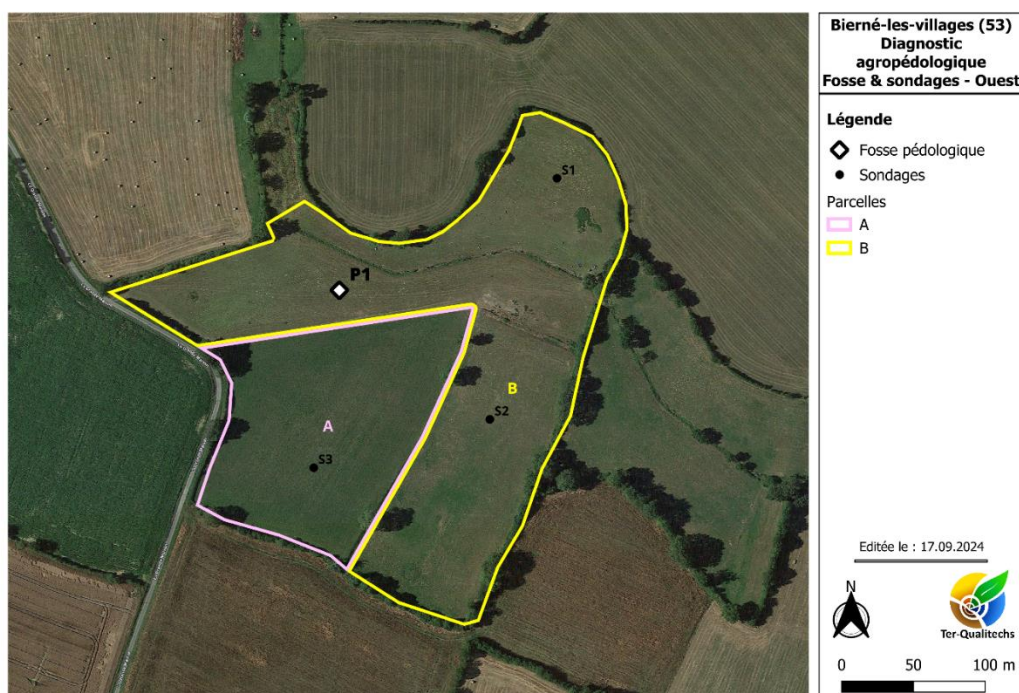


Figure 2 - Emplacement des sondages et fosses pédologiques – Partie Est

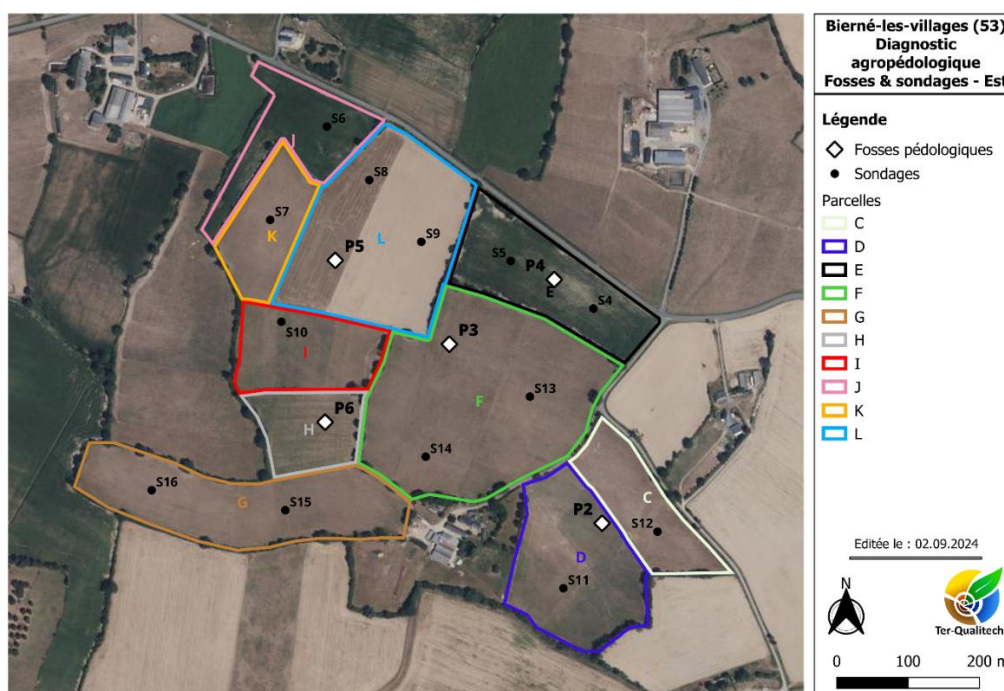


Figure 3 - Emplacement des sondages et fosses pédologiques – Partie Ouest

Ces différents sondages ont permis de déterminer la réserve utile (RU) pour chacun d'eux. La réserve utile en eau d'un sol représente la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et restituer aux racines d'une plante. Sa valeur dépend de plusieurs caractéristiques du sol : la texture, la teneur en éléments grossiers (EG) et la profondeur du sol (INRAE, 2018). La valeur de RU est entrée dans le logiciel OPTISOLEO afin de réaliser la modélisation.

Les données utilisées pour le calcul de la RU sont présentées dans le Tableau 2. Celle-ci est calculée par la formule suivante :

$$RU = H * RUE * \left(1 - \frac{EG}{100}\right)$$

RU : Réserve Utile (mm)

H : Hauteur de prélèvement en cm

RUE : Réserve Utile Élémentaire en mm/cm

EG : Éléments grossiers (%)

Tableau 2 - Calcul de la réserve utile en eau de chaque profil pédologique
(RUE : Réserve Utile Élémentaire / EG : Éléments grossiers)

Prélèvement	Hauteur (cm)	RUE mini (mm/cm)	RUE maxi (mm/cm)	EG (%)	RU mini (mm)	RU maxi (mm)
P1	45	1,7	1,9	4,0	73	82
P2	40	1,7	1,9	2,2	67	74
P3	40	1,6	1,9	0,3	64	76
P4	45	2,2	2,4	4,5	95	104
P5	30	1,7	1,9	4,5	49	54
P6	50	2,2	2,4	2,4	107	117

La Réserve Utile Élémentaire (RUE) s'exprime en mm/cm et est estimée selon la texture du sol. Elle s'exprime par une gamme de valeurs de RU par classe de texture, issues de différents modèles d'estimation de RU utilisés en France (Arvalis, 2020).

La valeur de RU utilisée pour la modélisation est de 84,5 mm ici. Elle a été calculée en réalisant la moyenne des RU maximales (Tableau 2). Les valeurs maximales ont ici été utilisées car les sondages ont été réalisés après la période estivale sur une faible hauteur de sol. Il est donc possible que les valeurs présentées dans le Tableau 2 soient légèrement sous-estimées.

La RU est calculée sur 1m. Ici, les valeurs n'ont pas été extrapolées car on considère que les racines des plantes ne peuvent pas atteindre d'horizons plus profonds que les hauteurs présentées dans le tableau. On considère donc que la RU sur 45 cm est la même que celle sur 1m par exemple.

Le modèle nécessite également une valeur de réserve facilement utilisable (RFU). Celle-ci correspond à la part de RU qu'une espèce peut extraire sans réduire sa transpiration, ni subir de stress hydrique ou limiter sa croissance. Elle représente généralement 40 à 80% de la RU selon la profondeur du sol et les espèces cultivées (Arvalis, 2024). Par défaut, on considère ici que la RFU est égale à 1/2 de la RU pour un sol moyennement enraciné (Chambre d'agriculture), soit 42,3mm.

1.4. Données météorologiques

Les données météorologiques sont calculées à partir des données statistiques mensuelles sur une période de base (2001 – 2020). Ces données sont interpolées de stations météo, ou à partir de données satellites si les données d'une station proche ne sont pas disponibles. Elles correspondent aux années météorologiques typiques actuelles (TMY) et sont issues de l'API Meteonorm.

Dans le cas de Bierné, elles sont définies par les données présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Indicateurs météorologiques caractéristiques de Bierné

Indicateur	Valeur
Nombre de jours de stress thermique ($T^{\circ} > 25^{\circ}\text{C}$)	47
Déficit en eau (mm)	-136,1
Précipitations annuelles (mm)	659,3
Nombre de jours avec des précipitations intenses ($> 25\text{mm}$)	0
Température moyenne annuelle ($^{\circ}\text{C}$)	12,3

1.5. Les zones agrivoltaïques

Dans le logiciel, les microclimats sont définis selon 4 zones :

- **La zone témoin** : zone de contrôle vierge d'installation agrivoltaïque. Elle sert de référentiel.
- **La zone sous panneaux** : zone à l'aplomb des panneaux, amputée de la zone cultivable.
- **La zone inter-rang** : zone entre les panneaux.
- **La zone AgriPV** : zone cultivable du projet. C'est la moyenne pondérée par des surfaces en inter-rang et sous les panneaux.

Dans cette étude, nous nous attacherons surtout à comparer la zone témoin à la zone AgriPV, car l'objectif est d'observer la productivité à l'échelle de la parcelle.

Ces zones permettent de définir un facteur d'hétérogénéité : il reflète l'hétérogénéité induite par la présence des panneaux.

2. Irradiance sur la parcelle agrivoltaïque

La Figure 4 compare le pourcentage de l'irradiance sur la zone témoin et le pourcentage de l'irradiance sur la zone agrivoltaïque. L'irradiance correspond à la quantité d'énergie solaire arrivant chaque seconde sur une surface de 1m² perpendiculaire aux rayons du Soleil. Le modèle OPTISOLEO utilise l'irradiation horizontale globale (GHI) comme la somme de deux composantes : l'irradiation horizontale directe (BHI) et l'irradiation horizontale diffuse (DHI) (Perez et al., 1990).

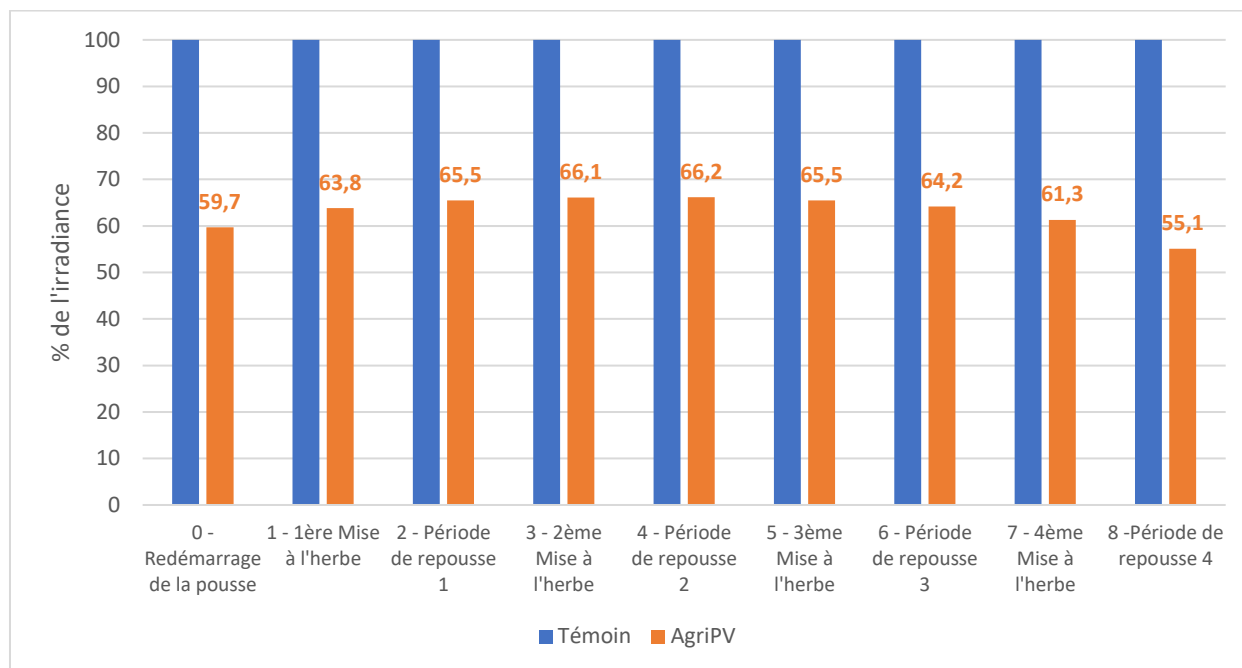


Figure 4 - Modélisation de l'irradiance (%) par stade de développement

L'irradiance sur la parcelle baisse de manière significative lors de l'installation de panneaux photovoltaïques. En moyenne, le taux d'irradiance sur l'année pour la zone AgriPV est de 63% contre 100% sur la zone témoin. L'irradiance est la plus faible au moment de la 4^{ème} période de repousse (55,1%) et la plus haute au moment de la 2^{ème} période de repousse (66,2%), en fin de saison. L'irradiance varie sur la zone AgriPV varie un peu au cours de l'année (11% au maximum).

L'ombre portée par les panneaux diminue ainsi l'irradiance sur la prairie, ce qui explique la potentielle perte de rendement (voir partie 6) observée dans la modélisation.

3. Bilan hydrique

La Figure 5 présente le déficit en eau et l'évapotranspiration maximale modélisés en fonction de la période de pousse de l'herbe et de la zone photovoltaïque.

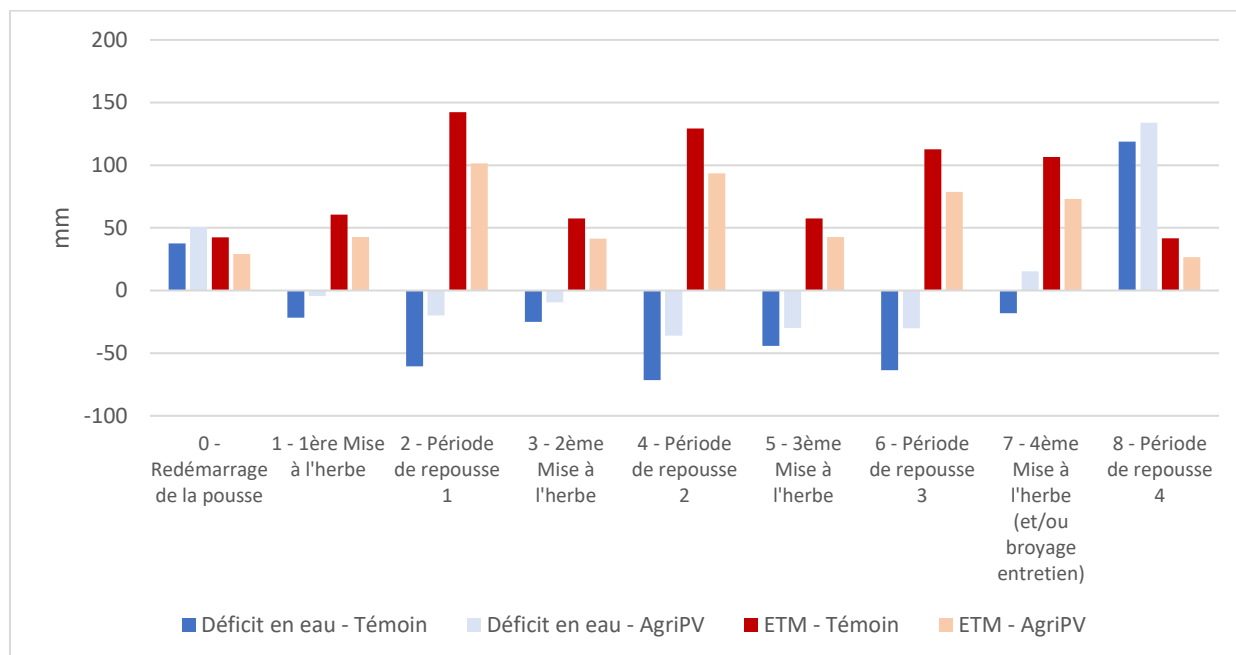


Figure 5 - Modélisation du déficit en eau et de l'évapotranspiration maximale (mm) par période de pousse de l'herbe

Le déficit hydrique représente la différence cumulée entre l'évapotranspiration potentielle (évaporation du sol et transpiration de la végétation) et les précipitations (Eau France, 2025). En fonction du stade de la culture, on observe que le déficit en eau est très différent au cours de l'année. Il est systématiquement plus important dans la zone témoin. On en déduit donc que la présence de panneaux permet de préserver de manière significative l'évapotranspiration sur la parcelle. Au total, sur l'année, la présence de panneaux permet de passer d'un déficit hydrique de -148,4 mm sur la zone témoin à +70,2 mm sur la zone AgriPV.

Le témoin est également systématiquement confronté à une évapotranspiration maximale (ETM) supérieure à la zone agrivoltaïque. L'ETM se calcule en fonction de l'évapotranspiration potentielle et d'un coefficient cultural (K_c), propre à chaque culture, permettant de ramener le potentiel aux conditions réelles (UVED, 2014). Au total sur l'année, la présence de panneaux permet de diminuer l'ETM de 221 mm. Pour une ETM de 100% dans la zone de témoin, l'évapotranspiration maximale est de 70,1% dans la zone AgriPV en moyenne sur l'année.

De même, la présence de panneaux photovoltaïques permet de diminuer le nombre de jours de stress hydrique sur l'année de 21 jours, notamment au moment de la première période de repousse, où la zone témoin présente 42 jours de stress hydrique contre 36 en zone AgriPV.

Ainsi, l'installation agrivoltaïque apparaît très favorable à la préservation de l'état hydrique de la prairie.

4. Stress thermique

La Figure 6 présente le nombre de jours de gel et le nombre de jours de stress thermique en fonction de la zone témoin ou la zone AgriPV.

Le nombre de jours de stress thermique représente le nombre de jours où la température maximale a été supérieure à 25°C. Le nombre de jours de gel correspond au nombre de jours où la température minimale a été inférieure à 0°C.

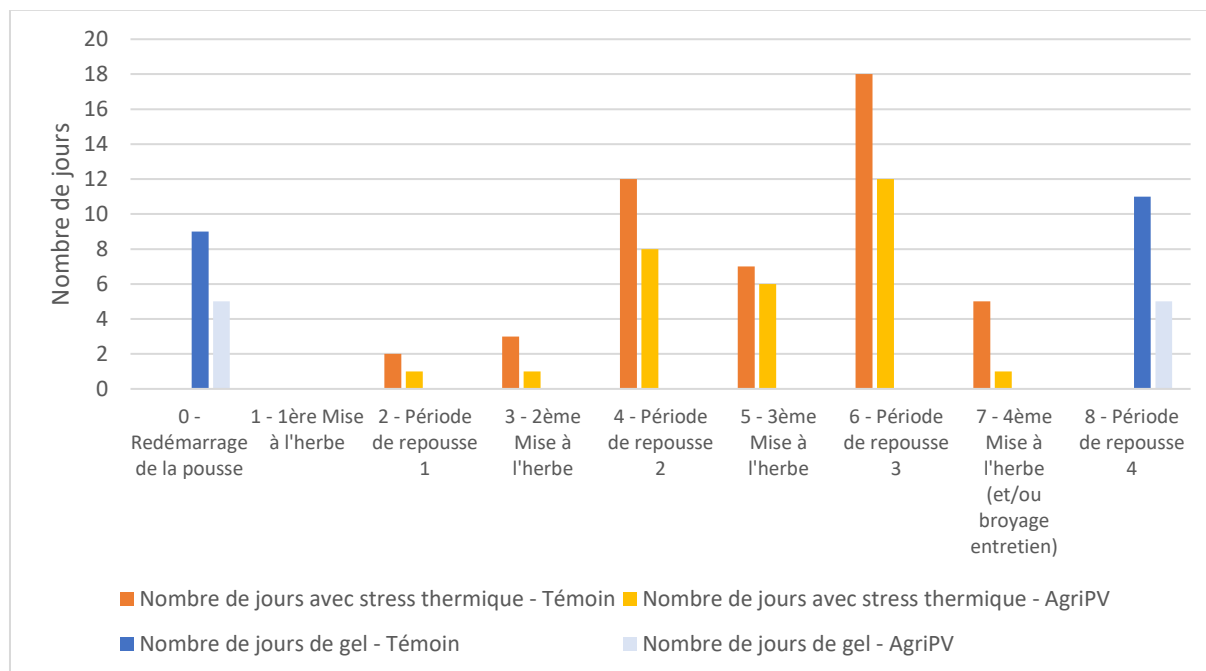


Figure 6 - Nombre de jours de stress thermique sur l'année - comparaison de la zone témoin et de la parcelle AgriPV

Le modèle prévoit un nombre de jours de gel multiplié par deux sur la zone témoin par rapport à la zone AgriPV au total sur l'année. Le nombre de jours avec un stress thermique passe de 47 dans la zone témoin à 29 dans la zone AgriPV. Lors de la troisième période de repousse (période estivale), le nombre de jours avec stress thermique est de 18 dans le témoin contre 12 en zone AgriPV.

En cumulé sur l'année, le nombre de jours de stress a été fortement réduit dans la zone agrivoltaïque par rapport au témoin puisque la présence de panneaux permet de réduire de 50% le nombre de jours de gel et de 38,3% le nombre de jours de stress thermique. L'installation agrivoltaïque apparaît donc avoir un impact positif pour l'atténuation des écarts thermiques vis-à-vis de la prairie en place.

5. Indicateur de bien-être animal

Le THI (Temperature-Humidity Index ou indice de température et d'humidité) est un indice qui combine la température de l'air et l'humidité relative pour évaluer le niveau de stress thermique ressenti par les animaux. Les différents seuils de bien-être animal en fonction du THI sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 - Niveau de stress des animaux en fonction du THI

THI	Niveau de stress
< 68	Absence de stress thermique
68 - 72	Stress léger
72 - 78	Stress modéré
78 - 82	Stress marqué
82 - 84	Stress important
84 - 86	Stress extrême
> 86	Stress mortel

La Figure 7 présente le nombre de jours où les animaux peuvent se trouver en situation de stress thermique en comparant la zone témoin et la zone sous les panneaux en fonction des différents scénarios agrivoltaïques. Lorsqu'une structure photovoltaïque est présente sur la parcelle, on observe que celle-ci permet de baisser les jours de stress de 19 jours, en cumulé sur l'année, soit une baisse de 14,5% par rapport au témoin. Ce phénomène est notamment en lien avec la réduction du nombre de jours de stress thermique sur la parcelle, présentée dans la partie précédente. Sous les panneaux, on trouve plus de jours avec un stress léger que dans la zone témoin qui, elle, est plus facilement soumise à des stress plus importants. Notamment les stress extrêmes, où l'on compte 6 jours dans la zone témoin et 1 seul sous les panneaux.

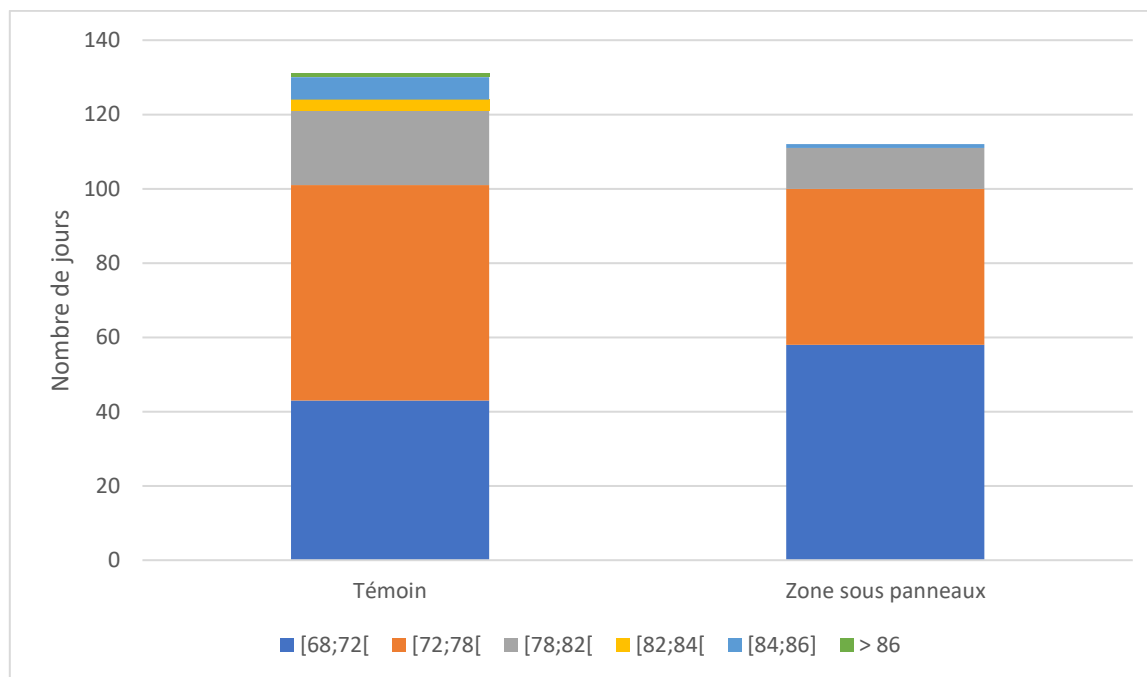


Figure 7 - Nombre de jours de stress thermique pour les animaux

Ainsi, la présence des panneaux solaires permettra d'offrir une protection thermique efficace aux ovins, en réduisant l'exposition aux températures élevées et en limitant les épisodes de stress thermique intense. En moyenne, les ovins sous panneaux sont moins exposés aux conditions extrêmes, ce qui favorise leur bien-être.

6. Productivité de la prairie

Le logiciel OPTISOLEO permet de modéliser la dynamique de pousse de l'herbe ainsi que la production récoltable en biomasse vivante (Lemaire, 1991). La modélisation est basée sur les équations et hypothèses de Duru et al. (2010) et Cros et al. (2003)

6.1. Production annuelle

La réglementation impose que l'installation agrivoltaïque maintienne la production à 90% minimum du potentiel de production sur la parcelle. Ce seuil ne doit donc pas être dépassé afin que l'installation n'impacte pas de manière significative la production agricole. La Figure 8 présente la modélisation de production de l'herbe sur la zone témoin et la zone AgriPV.

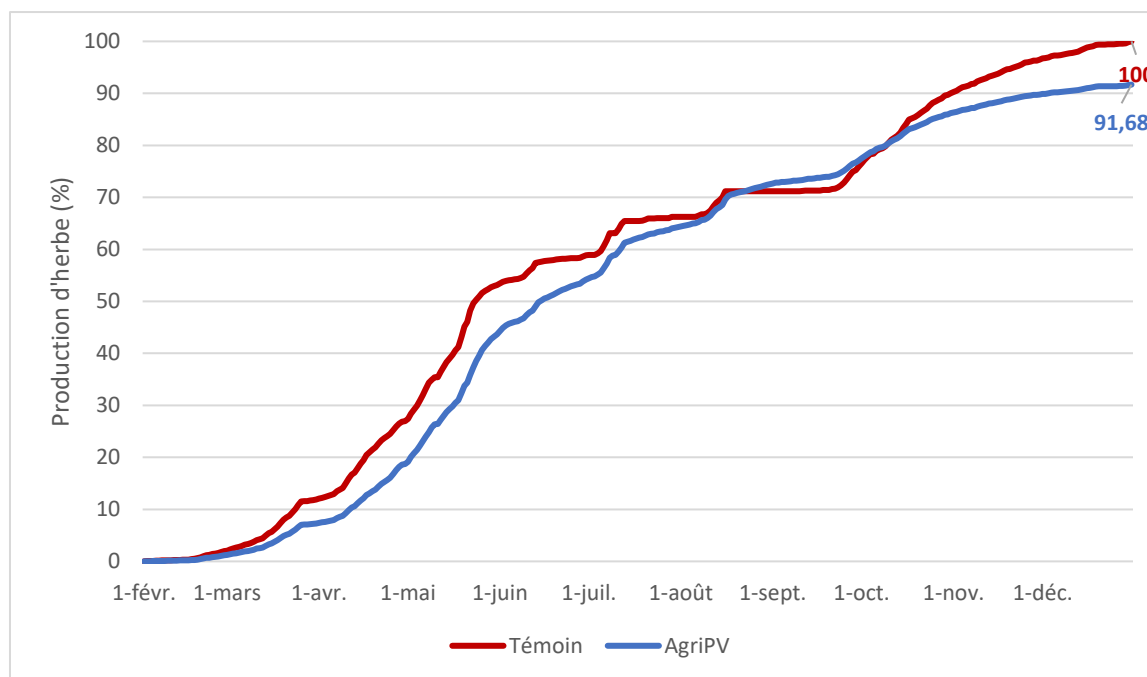


Figure 8 - Modélisation de la production d'herbe (% de la capacité maximale) selon les différents scénarios

L'étude de la production cumulée sur l'année montre que l'implantation de la structure agrivoltaïque permettra de produire 91,68% du potentiel de la parcelle. L'installation permet donc le respect de la réglementation.

6.2. Dynamique de pousse sur l'année

La Figure 9 présente la dynamique de pousse (estimée en kgMS/ha) annuelle de la zone AgriPV en fonction de la zone témoin.

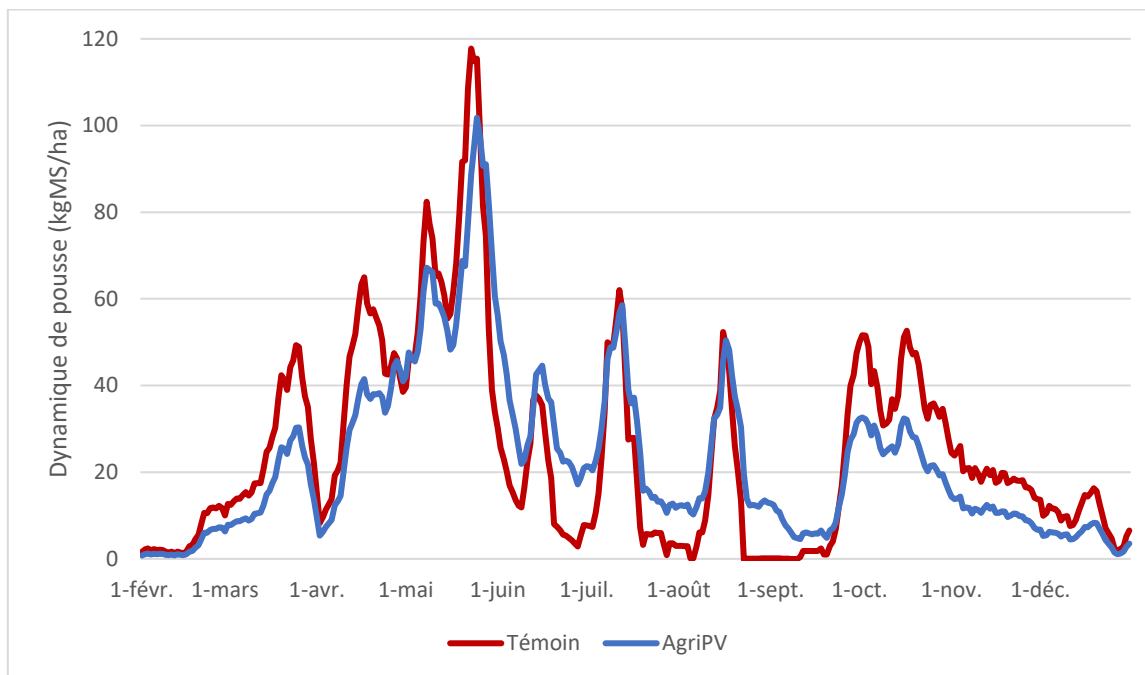


Figure 9 - Modélisation de la dynamique de pousse sur l'année (en kgMS/ha)

La dynamique de pousse sur l'année montre que la production sur la zone témoin est plus importante dès le mois de février. Le 23 mai, on trouve un pic de production, qui marque un écart de 29 kgMS/ha entre la zone témoin et la zone AgriPV. Après le 28 mai, la production en zone AgriPV devient supérieure au témoin, puis elle reste généralement supérieure jusqu'à fin septembre (Figure 9).

On observe donc que la production d'herbe dans la parcelle agrivoltaïque est inférieure à certains moments de l'année (entre février et mai et entre octobre et décembre, soit les périodes hivernales et de printemps), tandis qu'elle apparaît supérieure à d'autres moments (de juin à fin septembre, soit la période estivale). Surtout lors de la période estivale, les écarts de production sur la parcelle agrivoltaïques semblent moins importants.

D'un point de vue global, la présence de panneaux permet donc une production d'herbe sur une période plus longue, avec moins de pics de production et équivalente à 91,68 % du potentiel de production de la parcelle témoin. Cela peut représenter un avantage pour l'éleveur, car les panneaux allongent la période de production de l'herbe, cela la rend plus facile à valoriser. Par exemple, la production est maintenue entre juillet – août sur la parcelle AgriPV tandis qu'elle est quasiment nulle à certaines périodes sur la zone témoin.

7. Bilan

Ces différents indicateurs, étudiés et compilés permettent d'évaluer la pertinence de l'installation agrivoltaïque sur la parcelle. Le Tableau 5 récapitule certains indicateurs présentés par le logiciel et compare la situation la plus favorable (en vert) à la situation la plus défavorable (en rouge).

Tableau 5 - Récapitulatif des différents indicateurs en fonction de la zone témoin ou AgriPV

	Témoin	AgriPV	Signification de l'indicateur
Irradiance moyenne AgriPV (%)	100	63	Quantité d'énergie solaire arrivant chaque seconde sur une surface de 1m ² perpendiculaire aux rayons du Soleil. (Ensoleillement qui parvient jusque la végétation)
ETM totale (mm)	795,9	560,9	Propre à chaque culture, permettant de ramener l'évapotranspiration potentielle aux conditions réelles
Déficit hydrique total (mm)	-148,4	70,2	Différence cumulée entre l'évapotranspiration potentielle (évaporation du sol et transpiration de la végétation) et les précipitations
THI sous les panneaux (nombre de jours)	131	112	Niveau de stress thermique ressenti par les animaux (combinaison des indicateurs de température et d'humidité)
Production d'herbe totale AgriPV (%)	100	91,68	Cumul de la production d'herbe sur la parcelle AgriPV comparé à la référence de la zone témoin

○ Irradiance

L'irradiance moyenne sur l'année baisse quasiment de moitié sur la parcelle AgriPV. L'ombre portée par les panneaux diminue l'irradiance sur la prairie et peut expliquer la potentielle perte de rendement sur la parcelle AgriPV.

○ Bilan hydrique

En ce qui concerne les indicateurs hydriques, l'installation agrivoltaïque permet de conserver de manière considérable l'état hydrique de la parcelle. Ce facteur peut permettre la production d'herbe au moment de périodes plus sèches sur la parcelle AgriPV. Globalement, la parcelle apparaît moins soumise à des stress climatiques.

- Bien-être animal

Les installations photovoltaïques permettent de meilleures conditions pour les animaux présents sur les parcelles par rapport à la zone témoin.

- Production d'herbe

La modélisation de production annuelle d'herbe montre que les panneaux permettront de conserver 91,68% du potentiel de pousse. Ce seuil se situe au-delà du seuil de 90% actuellement défini par le décret du 8 avril 2024. La Figure 9 montre que, même si la production est un peu plus faible dans la zone AgriPV, les panneaux permettent une production plus homogène sur toute l'année et permettront de maintenir la production lors de périodes critiques telles que le mois de juin à septembre. Cet étalement des périodes de production peut représenter un avantage pour l'éleveur afin de maintenir sa production de fourrages sur toute l'année sur la parcelle en question.

Bibliographie

Arvalis, 2020. *Interprétation de l'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires*. Guide pratique.

Arvalis, 2024. *RFU vs RU : seule une partie de l'eau du sol est facilement exploitée par les plantes*. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/seule-une-partie-de-leau-contenue-dans-le-sol-est-facilement-exploitee-par-les>

Chambre d'Agriculture du Gers. *Le Bilan hydrique*.

Cros MJ, Duru M, Garcia F, Martin-Clouaire R (2003). A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie, EDP Sciences*, (2003), 23 (2), pp.105-122.

Eau France. *Déficit hydrique*. <https://www.eaufrance.fr/glossaire/deficit-hydrique>

Duru M, Cruz P, Martin G, Theau JP, Charon MH, et al. (2010). Herb'sim : un modèle pour raisonner la production et l'utilisation de l'herbe. *Fourrages*, 2010, 201, pp.37-46.

Fourrages (1987) 112, 325-344.

G. Lemaire (1987). *Physiologie de la croissance de l'herbe : application au pâturage*.

INRAE, 2018. *Gis Sol » Réserve utile en eau des sols*. <https://www.gissol.fr/thematiques/reserve-utile-en-eau-des-sols-18>

R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, J. Stewart, "Modeling Daylight Availability and Irradiance Component from Direct and Global Irradiance". *Solar Energy*, vol.44, no.5, pp 271-289. 1990.

UVED, *Processus écologiques - Définitions des termes de l'équation du bilan hydrique*, 2014. <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/EquationBilanHydrique.html>

Glossaire

AgriPV : Agri-photovoltaïque ou Photovoltaïque Agricole

BHI : Irradiation Horizontale Directe

DHI : Irradiation Horizontale Diffuse

EG : Eléments Grossiers

ETM : Evapotranspiration Maximale

GHI : Irradiation Horizontale Globale

H : Hauteur

Ha : Hectares

Kc : Coefficient cultural

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RU : Réserve Utile

RUE : Réserve Utile Elémentaire

THI : Temperature-Humidity Index ou indicateur de température et d'humidité

tMS : tonnes de Matière sèche

Table des figures

Figure 1 – Dimensions types des structures fixes mises en place par Neoen	3
Figure 2 - Emplacement des sondages et fosses pédologiques – Partie Est	4
Figure 3 - Emplacement des sondages et fosses pédologiques – Partie Ouest.....	5
Figure 4 - Modélisation de l'irradiance (%) par stade de développement	7
Figure 5 - Modélisation du déficit en eau et de l'évapotranspiration maximale (mm) par période de pousse de l'herbe	8
Figure 6 - Nombre de jours de stress thermique sur l'année - comparaison de la zone témoin et de la parcelle AgriPV	9
Figure 7 - Nombre de jours de stress thermique pour les animaux.....	10
Figure 8 - Modélisation de la production d'herbe (% de la capacité maximale) selon les différents scénarios.....	11
Figure 9 - Modélisation de la dynamique de pousse sur l'année (en kgMS/ha)	12

Table des tableaux

Tableau 1 - Définition des différents stades de la prairie pris en compte par le modèle.....	4
Tableau 2 - Calcul de la réserve utile en eau de chaque profil pédologique (RUE : Réserve Utile Élémentaire / EG : Eléments grossiers)	5
Tableau 3 - Indicateurs météorologiques caractéristiques de Bierné	6
Tableau 4 - Niveau de stress des animaux en fonction du THI	10
Tableau 5 - Récapitulatif des différents indicateurs en fonction de la zone témoin ou AgriPV.....	13