

# Étude de Synergie agricole

## Projet agrivoltaïque ovin Centrale des Bussières Escofi - Nantois



*VP.1 : 4 novembre 2024, GMN (CQ : SH, FC).*

*VF.1 : 20 novembre 2024, GMN.*

*VF.2 : 24 novembre 2024, GMN.*



# SOMMAIRE

|                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTE DES FIGURES.....</b>                                                                                                         | <b>2</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>                                                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>GLOSSAIRE.....</b>                                                                                                                 | <b>4</b>  |
| <b>RESUME EXECUTIF .....</b>                                                                                                          | <b>5</b>  |
| <b>INTRODUCTION .....</b>                                                                                                             | <b>6</b>  |
| PRESENTATION DU PROJET AGRIPV .....                                                                                                   | 6         |
| L'AGRIVOLTAÏSME.....                                                                                                                  | 8         |
| OBJECTIFS DE L'ETUDE .....                                                                                                            | 10        |
| <b>RAPPELS MISSIONS PRECEDENTES .....</b>                                                                                             | <b>11</b> |
| AUDIT .....                                                                                                                           | 11        |
| OPTIMISATION.....                                                                                                                     | 13        |
| <b>OUTILS ET METHODE .....</b>                                                                                                        | <b>16</b> |
| FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL AGRISOLEO .....                                                                                            | 16        |
| <b>LE PROJET AGRIVOLTAÏQUE .....</b>                                                                                                  | <b>17</b> |
| L'EXPLOITATION .....                                                                                                                  | 17        |
| UN PROJET COMME UN LEVIER DE DIVERSIFICATION ET D'ACTION POUR ASSURER LE BIEN ETRE ANIMAL .....                                       | 18        |
| LA STRUCTURE AGRIPV .....                                                                                                             | 20        |
| IMPLANTATION RETENUE.....                                                                                                             | 21        |
| LA PRAIRIE .....                                                                                                                      | 22        |
| LE SOL ET LE CLIMAT .....                                                                                                             | 27        |
| <b>ÉVALUATION DES IMPACTS AGRONOMIQUES.....</b>                                                                                       | <b>35</b> |
| ATELIER OVIN .....                                                                                                                    | 50        |
| ADAPTION DE LA CENTRALE POUR L'ACTIVITE D'ELEVAGE .....                                                                               | 55        |
| <b>ÉVALUATION DE L'IMPACT ECONOMIQUE .....</b>                                                                                        | <b>57</b> |
| EFFET SUR LA MARGE BRUTE ET L'EBE .....                                                                                               | 57        |
| <b>SUIVI TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA SYNERGIE .....</b>                                                                                 | <b>60</b> |
| LE PROTOCOLE DE SUIVI .....                                                                                                           | 60        |
| LES ZONES TEMOINS.....                                                                                                                | 61        |
| <b>ADEQUATION AVEC LE CADRE REGLEMENTAIRE .....</b>                                                                                   | <b>64</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                                                                             | <b>66</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>                                                                                                                  | <b>68</b> |
| ANNEXE 1 : CADRE REGLEMENTAIRE.....                                                                                                   | 68        |
| ANNEXE 2 : DEFINITIONS DES SERVICES RENDUS A LA PARCELLE PAR LA STRUCTURE AGRIVOLTAÏQUE (LOI APER)<br>.....                           | 71        |
| ANNEXE 3 : CONDITIONS DE DEROGATION A L'OBLIGATION DE SE REFERER A UNE ZONE TEMOIN SELON LE DECRET<br>N°2024-318 DU 8 AVRIL 2024..... | 72        |
| ANNEXE 3 : EVALUTATION DU REVENU AGRICOLE DEFINI DANS L'ARRETE DU 5 JUILLET 2024 .....                                                | 72        |
| ANNEXE 4 : MODELISATION AGRISOLEO .....                                                                                               | 73        |



## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Localisation du projet. (Source : Agrisoleo) .....                                                                                                                | 6  |
| Figure 2. Cartes de rayonnement des variantes. (Source : Agrisoleo).....                                                                                                    | 14 |
| Figure 3. Structure retenue. (Source : Escofi).....                                                                                                                         | 14 |
| Figure 4. Variante initiale du projet.....                                                                                                                                  | 15 |
| Figure 5. Bilan de reproduction de l'atelier ovin. (Source : CA de la Meuse) .....                                                                                          | 19 |
| Figure 6. Structure fixe installée. (Source : Escofi) .....                                                                                                                 | 20 |
| Figure 7. Evolution de la prairie en fonction des paramètres climatiques majeurs (Figure adaptée de Gilles LEMAIRE-INRAe) .....                                             | 23 |
| Figure 8. Principe du pâturage tournant simplifié. (Source : PC-Consult) .....                                                                                              | 24 |
| Figure 9. Risque abiotique en fonction des stades de développement de la prairie (Source : Chambre d'agriculture Pays de la Loire, Bretagne et Normandie).....              | 26 |
| Figure 10. Types de sol dans la zone d'étude .....                                                                                                                          | 28 |
| Figure 11. Potentiel agronomique de la zone d'étude "grandes cultures" .....                                                                                                | 29 |
| Figure 12. Potentiel agronomique de la zone d'étude "prairies". .....                                                                                                       | 29 |
| Figure 13. Diagramme ombrothermique actuel et 2050. (Source : Meteonorm) .....                                                                                              | 30 |
| Figure 14 : Simulations à l'horizon 2050 réalisées dans le cadre du programme changements climatiques, pilotés par l'institut de l'élevage (Source : Idele) .....           | 33 |
| Figure 15. Nombre de jours >25°C en zone témoin et agriPV pour une année actuelle. (Source : Agrisoleo) .....                                                               | 35 |
| Figure 16. Nombre de jours <0°C en zone témoin et agriPV pour une année actuelle. (Source : Agrisoleo).....                                                                 | 35 |
| Figure 17. Nombre de jours >25°C en zone témoin et agriPV en 2050. (Source : Agrisoleo) .....                                                                               | 36 |
| Figure 18. Nombre de jours <0°C en zone témoin et agriPV en 2050. (Source : Agrisoleo) .....                                                                                | 36 |
| Figure 19 Carte de la fraction de rayonnement reçu au sol pour une année météorologique typique actuelle en zone nord. (Source : Agrisoleo) .....                           | 37 |
| Figure 20 Carte de la fraction de rayonnement reçu au sol pour une année météorologique typique actuelle en zone sud. (Source : Agrisoleo) .....                            | 38 |
| Figure 21. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en mm en zone nord (CALCOSOL caillouteux). (Source : Agrisoleo) .....                                           | 39 |
| Figure 22. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en mm en zone sud (CALCOSOL colluvial). (Source : Agrisoleo).....                                               | 40 |
| Figure 23. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en zone sud (RENDOSOL). (Source : Agrisoleo) .....                                                              | 40 |
| Figure 24 Dynamique de la pousse de l'herbe dans le CALCOSOL caillouteux au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle..... | 44 |
| Figure 25 Dynamique de la pousse de l'herbe dans le RENDOSOL au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle. ....            | 44 |
| Figure 26 Dynamique de la pousse de l'herbe dans le CALCOSOL colluvail au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle.....   | 45 |
| Figure 27. Potentiels de production prairiale en année actuelle et 2050. (Source : Agrisoleo) .....                                                                         | 46 |
| Figure 28. Indice température-humidité (ITH) à des niveaux de température et d'humidité particuliers. (Source : National Animal Diseases Information Services).....         | 51 |
| Figure 29. Nombre de jours par an sous stress thermique (ITH>68). (Source : Canari et Agrisoleo) .....                                                                      | 52 |
| Figure 30. Surfaces fourragères et en céréales à destination de l'atelier ovin.....                                                                                         | 54 |
| Figure 31. Aménagements pour l'atelier ovin .....                                                                                                                           | 56 |
| Figure 32. Typologie de sol au droit du projet des Bussières et zones témoin potentielles .....                                                                             | 63 |
| Figure 33. Relation entre accroissement de biomasse aérienne et quantité de rayonnement intercepté par un peuplement de fétuque élevée (Source : Lemaire, 1991) .....       | 76 |
| Figure 34. Évolution de l'efficacité d'interception du rayonnement visible par un peuplement de graminées en fonction de l'indice foliaire. (Lemaire, 1984).....            | 77 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1. Cycle de la prairie et facteurs climatiques .....                                                                              | 22 |
| Tableau 2. Effets climatiques sur les différentes phases du cycle des prairies. ....                                                      | 25 |
| Tableau 3. Indices agroclimatiques de la zone d'étude (valeurs médianes). (Source : Climadiag).....                                       | 31 |
| Tableau 4. Evolution des indicateurs agroclimatiques dans le futur proche pour la zone de Nantois. (Source : Climadiag et Agrisoleo)..... | 32 |
| Tableau 5. Impact du changement climatique sur la prairie .....                                                                           | 32 |
| Tableau 6. Impact de la structure agrivoltaïque sur les indicateurs agroclimatiques .....                                                 | 34 |
| Tableau 7. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Nord – CALCOSOL caillouteux.....                                                      | 42 |
| Tableau 8. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Sud – RENDOSOL.....                                                                   | 42 |
| Tableau 9. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Sud – CALCOSOL colluvial .....                                                        | 42 |
| Tableau 10. Potentiels de production prairiale en année actuelle et 2050. (Source : Agrisoleo) .....                                      | 46 |
| Tableau 11. Nombre de jours par an sous stress thermique (ITH>68). (Source : Canari et Agrisoleo) .....                                   | 52 |
| Tableau 12. Marge brute de l'atelier ovin .....                                                                                           | 58 |
| Tableau 13. Bilan économique avant et après projet (en euros) .....                                                                       | 59 |

## GLOSSAIRE

**ETP : Evapotranspiration potentielle** : L'ETP est liée à un couvert de référence.

**ETM : Evapotranspiration maximale** : selon la culture et selon les stades cultureux, caractérisés par un coefficient cultural Kc. L'ETM est égale à ETP, multipliée par le coefficient Kc.

**RU : Réserve Utile** : en mm, quantité d'eau qu'un sol peut absorber et restituer à la plante.

**RFU : Réserve Facilement Utilisable** : en mm, quantité d'eau qu'une plante peut extraire sans subir de stress.

**MS : Matière Sèche**

**PAR : Photosynthetically Active Radiation (Rayonnement Photosynthétique Actif)**

**TOS : Taux d'Occupation du Sol**

**Degrés jours** : moyenne entre la température maximale du jour et la température minimale, à laquelle on retire la température de base propre à chaque culture. Chaque stade est défini par un cumul de degré jours à atteindre. Permet d'estimer les dates des stades phénologiques d'une culture.

**Hétérogénéité du rayonnement** : Hétérogénéité H induite par la présence de panneaux. Soit  $\overline{Ryt}$  le rayonnement moyen reçu par une surface :

$$H = \frac{\overline{Ryt}(\text{zone sous panneaux}) - \overline{Ryt}(\text{zone inter-rang})}{2 * \overline{Ryt}(\text{zone agriPV})}$$

### Définition des zones Agrisoleo :

Le logiciel OptiSoleo permet de calculer des indicateurs agro-climatiques sur des zones d'études. Ce documents défini les différentes zones utilisées dans le logiciel : la zone sous panneaux, la zone inter-rangs et la zone agriPV.

Les microclimats sont définis selon 4 zones dans le logiciel :

- La **zone témoin** qui est la zone de contrôle, vierge d'une installation agrivoltaïque qui sert de référentiel aux études.
- La **zone sous-panneaux**
- La **zone inter-rangs**
- La **zone AgriPV** qui est la zone cultivable du projet. C'est la moyenne pondérée par surface des zones sous-panneaux et inter-rangs.

Ces zones sont définies à partir de la table centrale de la structure agrivoltaïque. Elles sont larges de la largeur de la table et représente un motif de la structure agriPV.

Si la bande cultivable est nulle, cela veut dire que toute la surface de la parcelle est cultivée. Dans ce cas :

- La zone sous-panneaux est la zone à l'aplomb des panneaux.
- La zone inter-rang, est la zone entre les panneaux
- La zone AgriPV est la zone cultivable du projet. C'est la moyenne pondérée par surface des zones sous-panneaux et inter-rang.

Si la bande cultivable est non nulle, cela veut dire qu'une partie de la parcelle n'est pas cultivée. Cela correspond à une bande autour des pieux qui est inaccessible à la mécanisation. Dans ce cas :

- La zone sous-panneaux est la zone à l'aplomb des panneaux amputée de la zone non cultivable.
- La zone inter-rang, est la zone entre les panneaux
- La zone AgriPV est la zone cultivable du projet. C'est la moyenne pondérée par surface des zones sous-panneaux et inter-rang.

## RESUME EXECUTIF

Le projet agrivoltaïque de Nantois, développé par Escofi, s'étend sur une zone clôturée de 40,9 hectares et vise à intégrer des panneaux photovoltaïques sur des terres agricoles exploitées par l'EARL des Bussièrès. Le système agrivoltaïque a été conçu pour optimiser à la fois la production d'énergie et la production prairiale, tout en contribuant au bien-être des ovins. Le projet accompagne la mise en œuvre d'un atelier ovin de 320 brebis allaitantes en pâturage tournant sur 90 ha dont les parcelles occupées par le projet. L'atelier ovin bénéficiera de la protection contre les aléas climatiques et le stress thermique.

L'étude montre que :

- **Impact climatique** : L'ombrage réduit l'évapotranspiration et le stress hydrique, augmentant ainsi la résilience face à la sécheresse.
- **Qualité de l'herbe** : L'ombre modérée favorise une teneur en protéines plus élevée, une meilleure digestibilité et une répartition équilibrée des minéraux essentiels, améliorant la qualité du fourrage.
- **Bien-être animal** : La réduction des jours de stress thermique contribue au confort thermique des ovins, tout en maintenant une alimentation de qualité.

Les points clés du projet sont résumés ci-dessous :

| Aspect                                | Détails du projet agriPV Nantois                                                                                                                                               |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effets sur le climat et le sol        | - Réduction de l'évapotranspiration de <b>33 %</b> , ce qui permet d'économiser <b>236 mm d'eau</b> par an, principalement en été.                                             |
|                                       | - Baisse des jours de températures > 25°C de <b>33 %</b> , limitant le stress thermique de la prairie.                                                                         |
|                                       | - Réduction de <b>41 % des jours de gel</b> hivernal.                                                                                                                          |
| Qualité et rendement de l'herbe       | - <b>Amélioration de la teneur en protéines</b> et en minéraux (azote, calcium, magnésium) dans l'herbe, grâce à l'ombrage modéré.                                             |
|                                       | - Meilleure digestibilité du fourrage grâce à un <b>rapport feuilles/tiges plus élevé</b> .                                                                                    |
|                                       | - Augmentation de la production de l'herbe respectivement de 101%, 103% et 98% selon le type de sol en année actuelle, soit 101,7% en moyenne pondérée à la surface.           |
| Bien-être animal                      | - Réduction du stress thermique avec <b>16 à 26 jours chauds en moins</b> (> 25°C), favorisant le confort des brebis.                                                          |
|                                       | - <b>Meilleure prise alimentaire et reproduction</b> grâce aux conditions thermiques optimisées.                                                                               |
|                                       | - Ombrage naturel qui protège les ovins des rayons directs du soleil.                                                                                                          |
| Production d'énergie et compatibilité | - Conformité aux exigences de la <b>loi APER</b> , permettant de combiner efficacement énergie solaire tout en améliorant la production agricole par rapport à la zone témoin. |

# INTRODUCTION

## PRESENTATION DU PROJET AGRIPV

La présente étude est menée dans le cadre du projet agrivoltaïque d'Escofi sur des terres situées sur les communes de Nantois, Naix au Forges et Menaucourt, dans la Meuse (55).

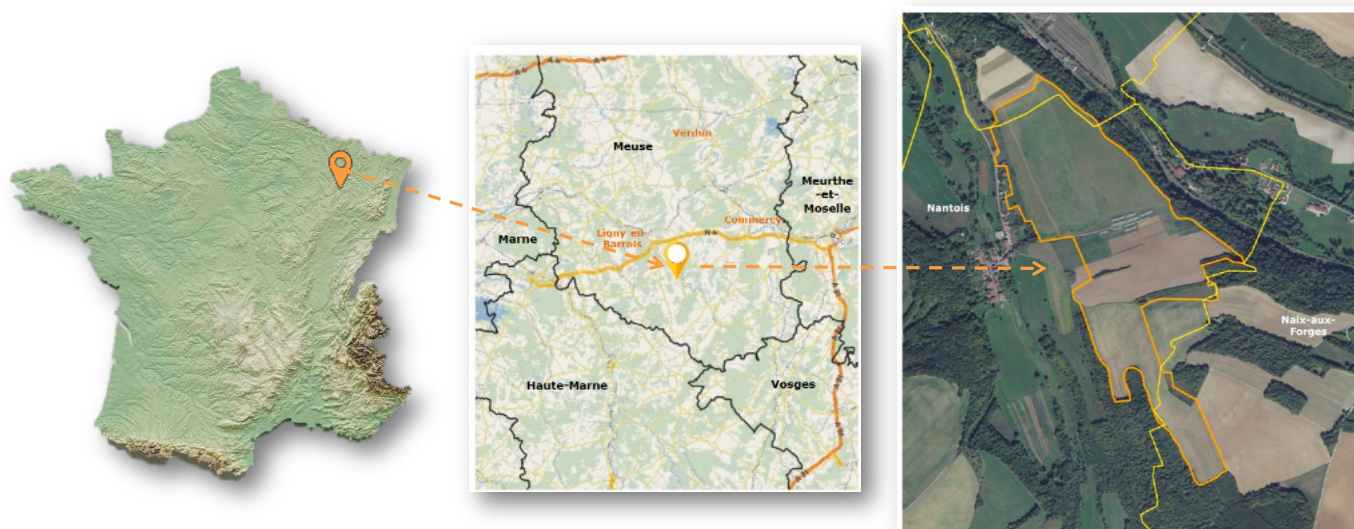


**Figure 1. Localisation du projet. (Source : Agrisoleo)**

Pour ce projet, les surfaces sont définies comme telles :

- Surface cadastrale : surface des parcelles cadastrales concernées par l'implantation.
- Surface agricole : surface des parcelles concernées par l'implantation et déclarées à la PAC. Ces surfaces intègrent notamment les haies bocagères comme c'est l'usage.
- Surface pâturée et fauchée : surface de la zone du projet qui sera pâturée et/ou fauchée par l'exploitant.
- Surface clôturée : surface située à l'intérieur des clôtures d'enceinte du projet. La clôture étant positionnée au ras des haies bocagères existantes en périmètre de parcelle, cette surface correspond à la surface réellement exploitée et exploitable. Il n'y a pas de perte de surface agricole par morcellement.
- Surface équipée : surface concernée par l'implantation de panneaux
- Surface artificialisée : surface agricole perdue : surface qui n'est plus exploitable du fait de la mise en œuvre du projet, ces surfaces peuvent être maintenues perméables ou non.

Ainsi, ces surfaces pour le projet des Bussièrès sont les suivantes :

- Surface cadastrale : 58,3 ha
- Surface agricole : 53,1 ha
- Surface pâturée et fauchée : 42.23 ha
- Surface clôturée : 40,9 ha
- Surface équipée : 33,9 ha
- Surface artificialisée : 2,9 ha

Les parcelles agricoles concernées par le projet appartiennent à M. BURNEL Sébastien ainsi que Mme BURNEL Monique et M. BURNEL Yohan. Sébastien Brunel est le seul associé de l'EARL des BUSSIERES qui exploite les terres.

Monsieur Burnel (EARL des Bussièrès) exploite 235 ha dont 160 ha de cultures en AB depuis 2012, 10 ha de maraîchage (commercialisation exclusive en vente directe) et 65 ha en prairie non mécanisable (pension annuelle éleveurs locaux). Historiquement sur la ferme, il y avait un élevage bovin (cessé depuis 7 ans) puis des volailles (cessé depuis 3 ans). En 2023, l'assolement de l'exploitation est composé de 188.1 ha d'herbe (43,8 ha de prairie permanente + 144.3 ha de luzerne), 10 ha de maraîchage, 30 ha d'avoine.

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Statut juridique</b>                                | EARL                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Nombre d'associés et d'employés</b>                 | 1 associé + 2 UMO                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Age des exploitants</b>                             | 44 ans – Installé en 2001                                                                                                                                                                                                |
| <b>SAU totale</b>                                      | 235 ha : 188.1 ha d'herbe (43,8 ha de prairie permanente + 144.3 ha de luzerne), 10 ha de maraîchage, 30 ha d'avoine.<br>Propriétaires des parcelles du projet : BURNEL Sébastien, Mme BURNEL Monique et M. BURNEL Yohan |
| <b>Productions actuelles sur l'exploitation</b>        | Productions céréalières, fourragères et maraîchères.                                                                                                                                                                     |
| <b>Production et surfaces concernées par le projet</b> | 33,9 ha ont été retenus pour l'implantation, actuellement exploités en luzerne ou culture de vente.                                                                                                                      |

### CONTEXTE

L'agrivoltaïsme vient répondre à deux enjeux globaux du XXI<sup>ème</sup> siècle en France.

D'une part, il s'agit de pérenniser l'usage des terrains agricoles face à une artificialisation des terres qui progresse chaque année. La conservation des sols agricoles est un levier majeur pour répondre aux défis de l'agriculture. Or, si la surface agricole utile couvre encore la majorité du territoire français avec 28,5 millions ha, soit 52 % du territoire national, les pertes annuelles moyennes de terres agricoles s'élèvent à 29 312 ha/an sur la période 2015-2020, contre près de 49 000 ha/an entre 2010 et 2015 et 88 000 ha/an entre 2000 et 2010. Ainsi, depuis 2000, ce sont 1 254 000 ha de surface agricole utile (SAU) qui ont été perdus par l'agriculture.

Un enjeu est donc d'assurer la sécurité alimentaire des Français, dans un contexte mondial où la population augmente ainsi que le niveau de vie moyen, entraînant un besoin de production agricole croissant. De plus, les effets néfastes du changement climatique impactent les rendements agricoles, avec une variabilité climatique en augmentation, des phénomènes extrêmes de plus en plus fréquents et une hausse globale des températures.

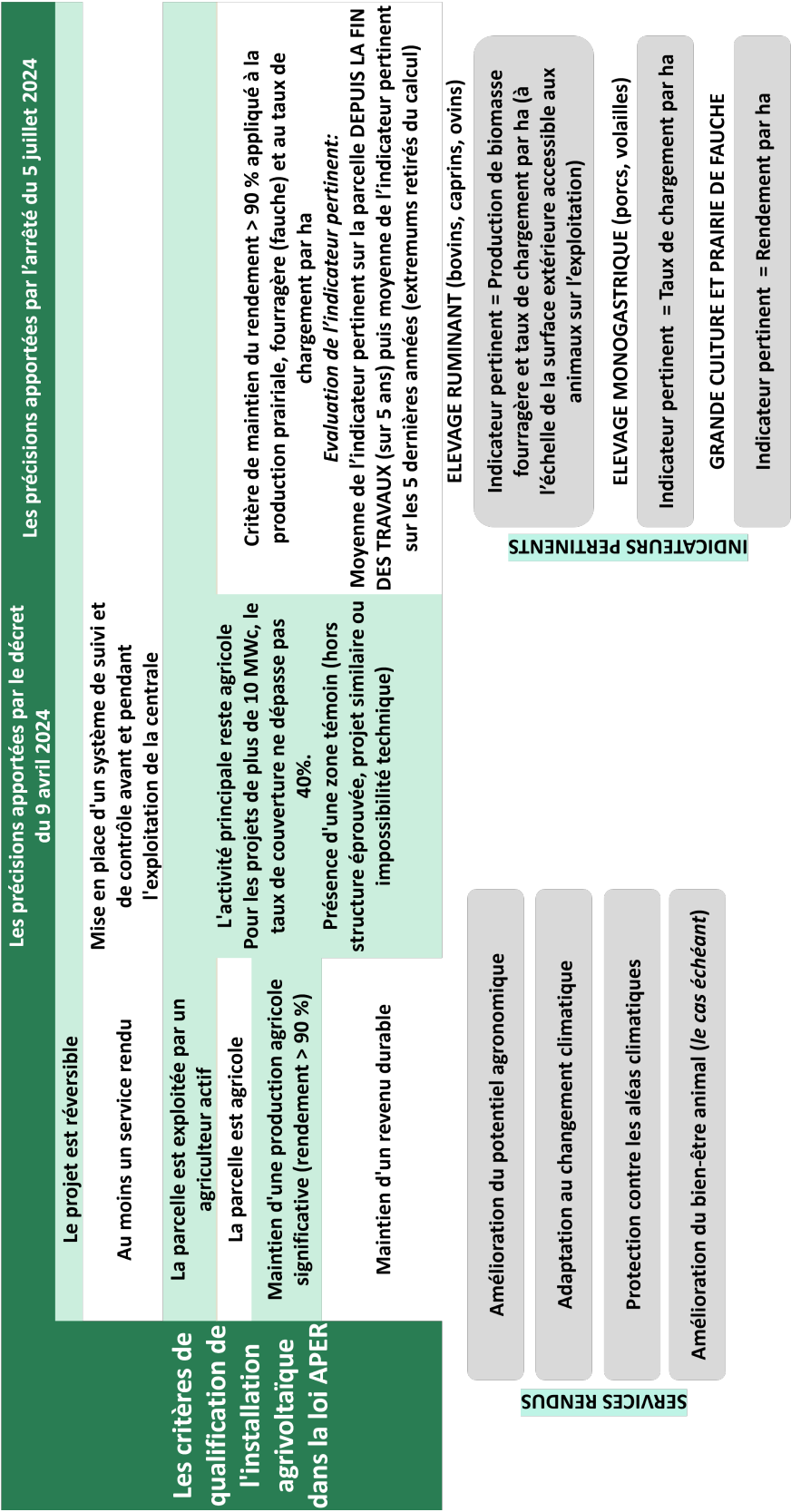
D'autre part, il s'agit de décarboner notre société par la production d'énergies renouvelables.

**À l'échelle européenne, la directive sur les énergies renouvelables a fixé la part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique des états membres à 42.5% d'ici 2030.**

**L'agrivoltaïsme constitue donc pour la France un atout afin d'atteindre l'objectif de 35 à 44 gigawatts de capacité photovoltaïque globale dès 2028, contre 20 GW en 2023.**

**Ce sont ainsi jusqu'à 135.000 hectares - soit environ 0,5 % de la surface agricole utile française - qui pourraient être concernés, selon la Fédération française des producteurs agrivoltaïques (FFPA).**







## OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude de synergie consiste à détailler le projet agrivoltaïque et caractériser la qualité de la solution retenue pour le projet, en évaluant notamment l'impact de l'installation agrivoltaïque sur la production agricole aujourd'hui et dans un futur proche.

L'étude va évaluer sous plusieurs aspects :

- Technique et agronomique : consiste à évaluer l'adéquation des microclimats induits par les panneaux avec la productivité des cultures.
- Économique : consiste à évaluer l'impact du projet sur les résultats des ateliers, puis sur les résultats de l'exploitation au regard de la situation initiale.
- Législatif : consiste à fournir une analyse détaillée justifiant le caractère agrivoltaïque du projet tel que défini dans les textes législatifs.

## RAPPELS MISSIONS PRECEDENTES

L'intervention d'AgrisoLeo est réalisée en 3 phases :

- Phase 1 : Audit : AgrisoLeo réalise une première évaluation du projet tel que présenté par les porteurs de projet, afin d'identifier les axes d'amélioration possibles.
- Phase 2 : Étude d'optimisation : AgrisoLeo teste, à partir de la structure de base, différents ajustements de la configuration pour améliorer les co-bénéfices agricoles.
- Phase 3 : Étude de synergie, sur la base de la configuration finale optimisée et de l'implantation finale, AgrisoLeo détaille les impacts et co-bénéfices de la synergie PV-Agricole, à court et moyen terme.

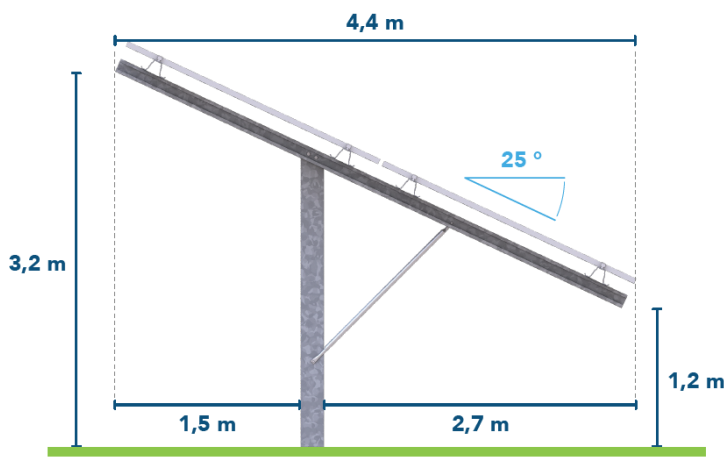
Les phases 1 et 2 réalisées préalablement sont résumées ci-après.

### AUDIT

Un audit de projet a été réalisé par AgrisoLeo afin d'appréhender le contexte agricole, le système de production concerné et les problématiques de l'exploitant, le contexte pédoclimatique local et de préciser les objectifs agronomiques du projet. L'audit vise à formuler un premier avis sur la qualité du projet agricole et sur la qualification agrivoltaïque du projet selon la définition de la loi APER.

Initialement, le projet prévoyait l'installation des structures suivantes, dites "Structures de base" :

- Structure fixe
- Orientée sud (azimut 0°)
- Hauteur bas de table à 1,2 m
- Distance interpieu (pitch) de 12 m soit un TOS de 36%
- Panneau mono faciaux



- Table en 2v12 de panneaux de 615 Wc, soit une table de dimension 4,8 m x 13,8 m
- Monopieux
- Azimut 0° (plein sud)
- Inclinaison 25°
- TOS : **36%**

- **Adéquation avec le statut agrivoltaïque de la loi APER sur le critère services directs (au moins 1 service) :**

| Services rendus                               | Projet agriPV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Réponse |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Amélioration du potentiel agronomique</b>  | Avec un pitch de 12 m, l'irradiance reçue en zone agriPV est d'environ 59 % sur l'année. En zone inter-rangs, elle est d'environ 76 %. Sous panneaux, seuls 34% du rayonnement sont reçus par la prairie. Cette différence traduit la forte hétérogénéité qui est de 36%<br>Ce niveau d'ombrage est un facteur limitant pour la production prairiale. | ?       |
| <b>Adaptation au changement climatique</b>    | En zone AgriPV, la baisse de l'ETP est d'en moyenne 33 % sur l'année, soit – 236 mm, dont – 161 mm entre le 01/04 et le 31/08<br>La structure agrivoltaïque apporte une protection forte contre le risque de stress hydrique.                                                                                                                         | ✓       |
| <b>Accès à la protection contre les aléas</b> | NA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | NA      |
| <b>Amélioration du bien-être animal</b>       | Baisse du stress thermique grâce à l'ombrage apporté par les panneaux, à la vue du contexte climatique (30 jours à plus de 25°C entre février et octobre et 74 jours de THI élevé).<br>Protection du cheptel contre la prédation                                                                                                                      | ✓       |

- **Analyse du caractère agrivoltaïque tel que défini dans l'Article L.314-36. du Code Energie – Critère Activité agricole principale et réversibilité de l'installation :**

| Questionnement                                                                    | Cas du projet                                                                                                                                                                                                                                      | Compatibilité                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Le projet affecte-t-il négativement le volume de production agricole ?</b>     | Maintien de l'activité agricole.<br>L'optimisation devra permettre de maintenir le niveau de productivité.                                                                                                                                         | <b>Maintien / augmentation de la production agricole à justifier</b> |
| <b>Le projet affecte-t-il négativement le niveau de revenu de l'exploitant ?</b>  | Le revenu agricole de l'exploitant devrait être à la hausse grâce à ce nouvel atelier d'après l'étude de la CA55. L'agriculteur devra néanmoins s'acquitter d'investissement pour établir le cheptel et aménager en bergerie un bâtiment existant. | <b>A justifier par une étude technico-économique</b>                 |
| <b>Emprise au sol de l'installation plus importante que la surface agricole ?</b> | GCR (TOS) = 36 %                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Conforme</b>                                                      |
|                                                                                   | Pas de donnée sur la surface non cultivable                                                                                                                                                                                                        | <b>A justifier</b>                                                   |
| <b>Projet adapté à l'activité d'élevage ?</b>                                     | Le point bas minimal est adapté au passage des ovins. Ilots délimités par des clôtures amovibles. Sécurisation du passage des câbles pour éviter les blessures. Portails adaptés aux engins et déplacement des animaux.                            | <b>Conforme</b>                                                      |
| <b>Installation photovoltaïque réversible ?</b>                                   | Pieux battus et garantie de démantèlement.                                                                                                                                                                                                         | <b>Conforme</b>                                                      |

**Le taux de couverture est conforme au critère de la loi APER. Le caractère agrivoltaïque du projet est bon par rapport à la problématique agroclimatique de l'exploitation. Le niveau d'ombrage apporté par la structure proposée (structure de base) pourrait être limitant et un ajustement pourrait être proposé, répondant à un meilleur compromis. C'est l'objectif de l'étude d'optimisation dont les conclusions sont présentées ci-après.**

## OPTIMISATION

L'étude d'optimisation consiste à comparer différentes solutions techniques afin d'assurer la meilleure synergie entre la production agricole et la production :

- Permettre la mécanisation pour la fauche : faucheuse déportée + tracteur (5,5 m), faneuse + tracteur (5,6m), andaineur (2,8 m),
- Garantir la production fourragère.

Pour ce second point, il s'agit de trouver le bon équilibre entre limiter l'évapotranspiration et apporter la lumière nécessaire à la plante : c'est là tout l'intérêt des simulations numériques réalisées en prenant en compte les typologies de sol (issus de l'étude agropédologique) et les données météorologiques locales.

La performance est évaluée sur les critères suivants, au regard de la zone témoin :

- Rayonnement en %
- ETP en %
- Production prairiale en %

Constatant que la structure de base ne permet pas de prévoir une production améliorée (-6,5% par rapport à sans panneau), nous avons cherché à **adapter la structure** pour garantir voire d'augmenter la production fourragère.

A TOS équivalent, des améliorations sont obtenues avec les adaptations suivantes :

- Rehausser le bas de table de 1,2 à 1,5 m (+ 3 % de production fourragère)
- Décaler l'azimut de 0° à 18 ° (+ 1,5 % de production fourragère et une meilleure mécanisation)
- Utiliser des panneaux bifaciaux, moins opaques (+ 5 % de production fourragère)

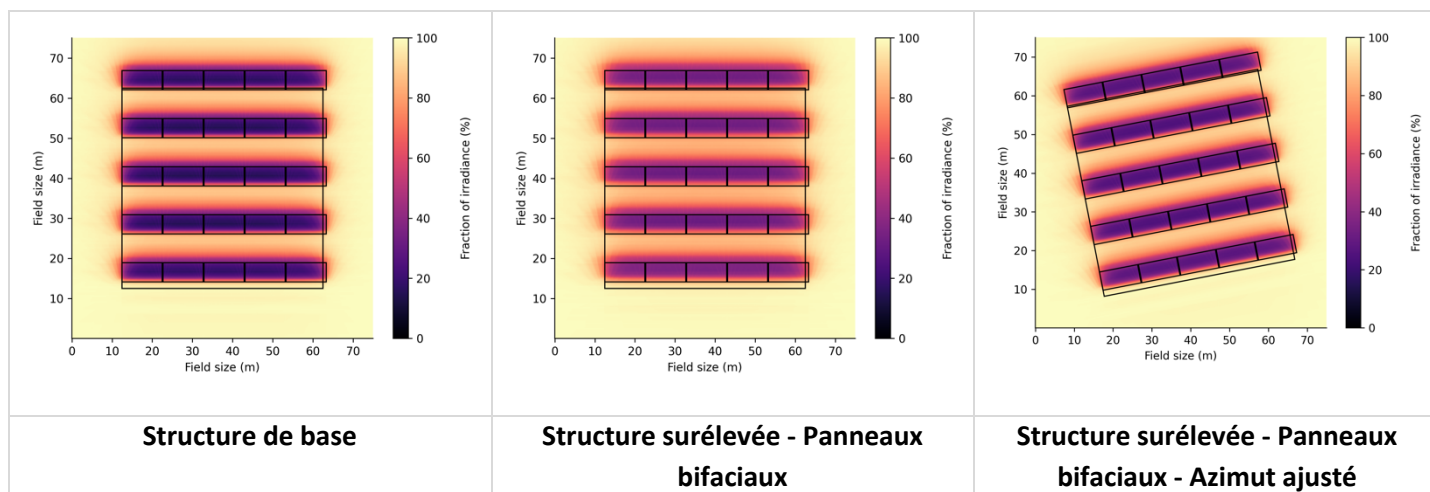


Figure 2. Cartes de rayonnement des variantes. (Source : Agrisoleo)

Ainsi, la structure suivante est retenue :



Figure 3. Structure retenue. (Source : Escofi)

Concernant le taux d'occupation, deux options ont été testées :

- Un TOS de 36 % correspondant à un interpieu de 12 m
- Un TOS de 30 % correspondant à un interpieu de 14,5 m

Les sols ayant des dynamiques différentes sur la réserve utile en eau, il ressort que la configuration optimale correspond à un TOS différencié entre la zone au Nord et la zone au Sud. En effet, sur la zone Nord (au nord des serres) en calcosol caillouteux, plus d'ombrage permet de mieux garder l'eau et maximiser la production fourragère. Au Sud, trop d'ombrage n'est pas favorable.

- Avec un TOS de 30% sur l'ensemble de la zone : production accrue de 2,08 %
- Avec un TOS différencié (36 % au nord, 30 % au Sud) : production accrue de 3,34 %

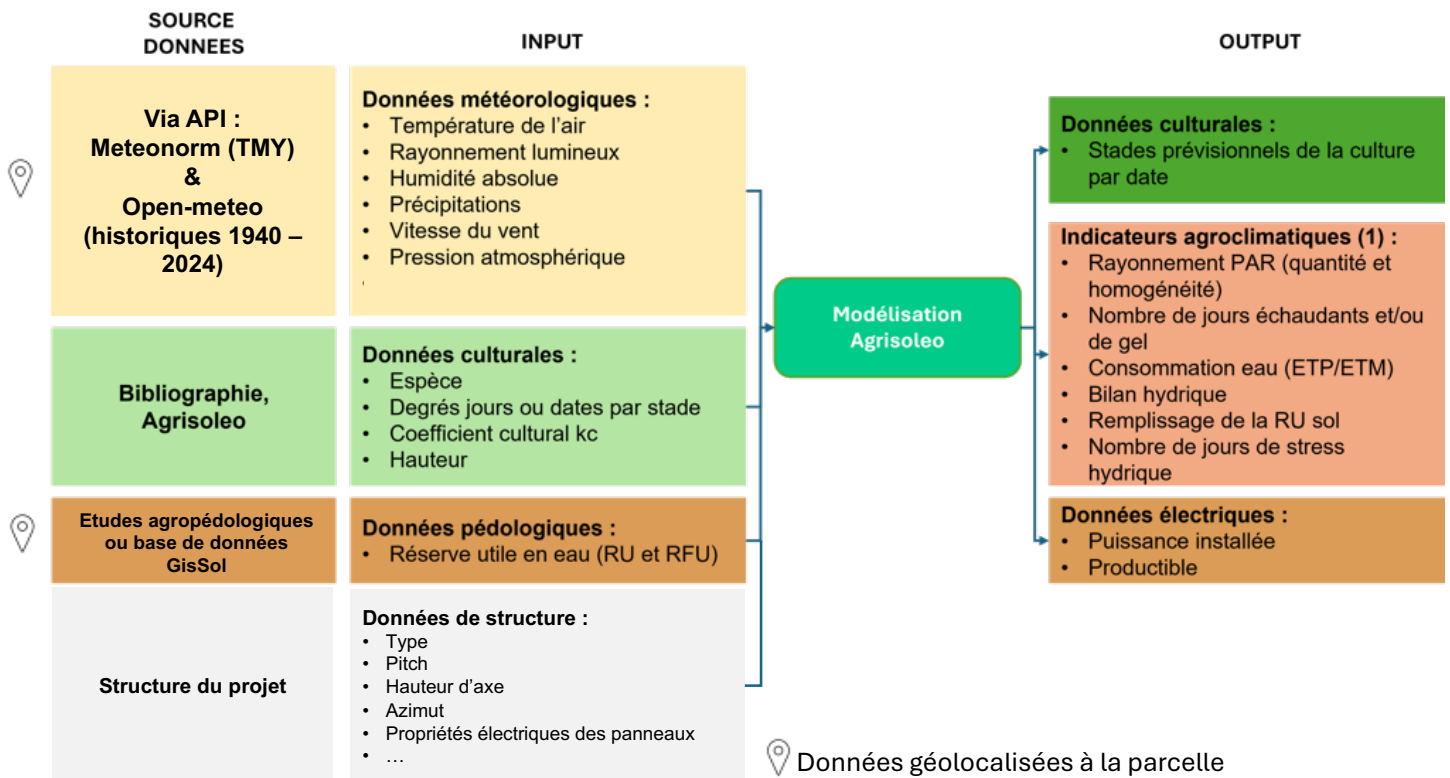




Figure 4. Variante retenue du projet

# OUTILS ET METHODE

## FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL AGRISOLEO



(1) Les indicateurs agroclimatiques peuvent être donnés par zone : témoin, sous-panneaux, entre-rangs et agriPV

# LE PROJET AGRIVOLTAÏQUE

## L'EXPLOITATION

Les parcelles agricoles concernées par le projet appartiennent à M. BURNEL Sébastien ainsi que Mme BURNEL Monique et M. BURNEL Yohan.

Sébastien Brunel est le seul associé de l'EARL des BUSSIERES qui exploite les terres.

|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Statut juridique</b>                                       | EARL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Nombre d'associés et d'employés</b>                        | 1 associé + 2 UMO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Age des exploitants</b>                                    | 44 ans – Installé en 2001                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>SAU totale</b>                                             | 235 ha : 188.1 ha d'herbe (43,8 ha de prairie permanente + 144.3 ha de luzerne), 10 ha de maraîchage, 30 ha d'avoine.<br>Propriétaires des parcelles du projet : BURNEL Sébastien, Mme BURNEL Monique et M. BURNEL Yohan                                                                                                            |
| <b>Productions actuelles sur l'exploitation</b>               | Productions céréalières, fourragères et maraîchères.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Production et surfaces concernées par le projet</b>        | L'ilot concerné par le projet représente 58 ha, et 33,9 ha ont été retenus pour l'implantation. Les parcelles concernées sont actuellement exploitées en luzerne ou culture de vente.                                                                                                                                               |
| <b>% SAU concernée par le projet</b>                          | Ilôt d'implantation : 22% - Surface d'implantation : 14,4%                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Type de production (label, normes, ...)</b>                | AB (sauf maraîchage)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Projet incluant des changements d'itinéraire technique</b> | L'EARL dispose d'une très grande surface en prairie temporaire.<br>Aujourd'hui, M. BURNEL conduit son assolement de la façon suivante : 4 années de luzerne ou mélange de légumineuse et une avoine sur la 5 <sup>ème</sup> année.<br>La surface qui sera dédiée au projet restera en prairie et deviendra de la prairie permanente |
| <b>Commercialisation &amp; Valorisation de la production</b>  | Légumes 100% en vente directe<br>Production de la luzerne pour la filière déshydratation                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Historique exploitation</b>                                | Retraite du père en 2021<br>Arrêt de l'élevage bovin en 2017 et de l'atelier volailles en 2021                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Projet d'évolution de l'exploitation</b>                   | Création du cheptel ovin pour valorisation de la surface fourragère                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Historique de rendement</b>                                | 25 q/ha en orge<br>6 tMS/ha en luzerne<br>2,5 tMS/ha pour la prairie                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Problématiques de l'exploitant</b>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terres à faible potentiel et faibles rendements</li> <li>• Parcelles en zone de captage d'eau potable</li> <li>• Irrégularité de la charge de travail</li> <li>• Main d'œuvre saisonnière à fidéliser</li> <li>• Irrégularité des revenus</li> </ul>                                       |
| <b>Prestations, CUMA, matériels en propriété</b>              | 100% autonome pour les opérations culturales sauf pour la moisson et le pressage.                                                                                                                                                                                                                                                   |



## UN PROJET COMME UN LEVIER DE DIVERSIFICATION ET D'ACTION POUR ASSURER LE BIEN ETRE ANIMAL

La stabulation des bovins ainsi que les 41,73 hectares de prairies naturelles, autrefois dédiées au pâturage, ne sont désormais plus valorisés au sein de l'exploitation.

La surface fourragère de l'exploitation est conséquente et bénéficierait d'une meilleure valorisation grâce à un atelier de production animale. M. Burnel envisage donc de relancer un atelier de ce type.

Cependant, ayant rencontré des difficultés à recruter du personnel qualifié pour l'élevage de bovins allaitants, il envisage maintenant de se diriger vers la production ovine.

L'atelier ovin comprendra environ **320 brebis** (équivalent à **48 UGB**), **80 agnelles** (équivalent à **8 UGB**) et **13 béliers** (équivalent à **2,6 UGB**), soit un total de **58,6 UGB**. Le troupeau sera constitué de brebis de la race **Mérinos de l'Est**. La production concernera des agneaux élevés en bergerie (environ 379 vendus par an). Une partie des agnelages se dérouleront en novembre et décembre, suivis d'une seconde vague de naissances en février et mars. Cette planification permet de scinder le troupeau tout en échelonnant les ventes d'agneaux sur plusieurs mois. L'alimentation des reproducteurs et des agneaux reposera sur une gestion optimisée des ressources en céréales et en fourrage, produites en grande partie sur l'exploitation. Une analyse détaillée des besoins et des surfaces allouées à ces cultures a été réalisée pour garantir l'autonomie alimentaire du troupeau. Elle est disponible en annexe. Les principales conclusions sont les suivantes.

L'approvisionnement en fourrage et en céréales du cheptel ovin sera donc réalisé par :

- L'utilisation des 41 ha de prairies naturelles existantes au sein de l'exploitation (10 ha sont fauchables),
- La mise en place de 43 ha de prairies permanentes associées au projet agrivoltaïque (tout est fauchable),
- La production de céréales dans une rotation dédiée sur 15 ha à destination des reproducteurs,
- L'alimentation des agneaux sera achetée.

Le bilan montre que cette organisation garantit l'autonomie alimentaire du cheptel et permet même de constituer des stocks fourragers pour faire face aux aléas climatiques.

Le bilan de reproduction et les résultats techniques de reproduction ont été élaborés par la Chambre d'agriculture de la Meuse dans le cadre de l'étude d'accompagnement du projet et sont rappelés dans le schéma ci-dessous.

## BILAN DE REPRODUCTION

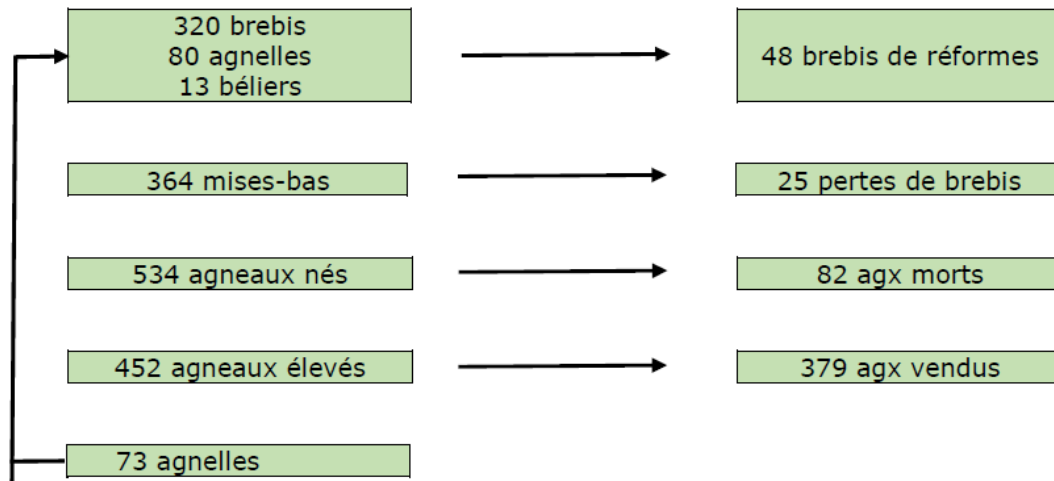


**Figure 5. Bilan de reproduction de l'atelier ovin. (Source : CA de la Meuse)**

Dans le cadre de cette diversification et la création de cet atelier ovin, la structure agrivoltaïque contribuera au bien-être animal.

### Effet de la structure sur le stress thermique

- Lors des jours chauds, le stress thermique est marqué entre les panneaux et modéré sous les panneaux [1] Lors de jours chauds, la fréquence respiratoire des animaux est plus faible sous les panneaux qu'en zone inter-rang [1]

→ La structure limite l'intensité du stress thermique

**Protection contre la prédation [2]**

## Amélioration du bien-être animal

### Effet de la structure sur le comportement des animaux

- La structure ne modifie pas le comportement des animaux (budget temps et synchronisation du troupeau) [1]
- La structure n'a pas d'impact sur la santé des brebis [1]

→ La structure n'a pas d'effet négatif sur le comportement des animaux

[1] Véronique DEISS (2023) Rapport d'étude sur le bien-être animal : Evaluation des effets de la présence de panneaux photovoltaïques sur le pâturage ovin pendant une période de deux ans (2022-2023). Etude menée conjointement avec l'INRAe, Starkraft et CVE.

[2] La présence du loup est officiellement avérée en Meuse depuis octobre 2013, date des premières prédatons constatées. L'année 2022 a été marquée par une nette augmentation des prédatons : 18 (contre 6 en 2021). La Meuse est donc le département du Grand-Est qui a subi le plus d'attaques en 2022. Les attaques portaient essentiellement sur le Sud meusien et l'extrême Nord Haut Marnais. (Source : DDT 55, Mis à jour le 08/02/2023)

## LA STRUCTURE AGRIPV

La structure finale étudiée dans l'étude de synergie, et présentée ci-dessous, est le fruit d'une réflexion nourrie par l'audit et l'optimisation réalisés par Escofi et Agrisoleo. Escofi a fait le choix de 2 implantations avec une structure fixe afin de s'adapter aux hétérogénéités de sol et à l'activité d'élevage. Celles-ci diffèrent entre elles par leur pitch : 12 m et 14,5 m.

La structure installée est décrite ci-dessous :

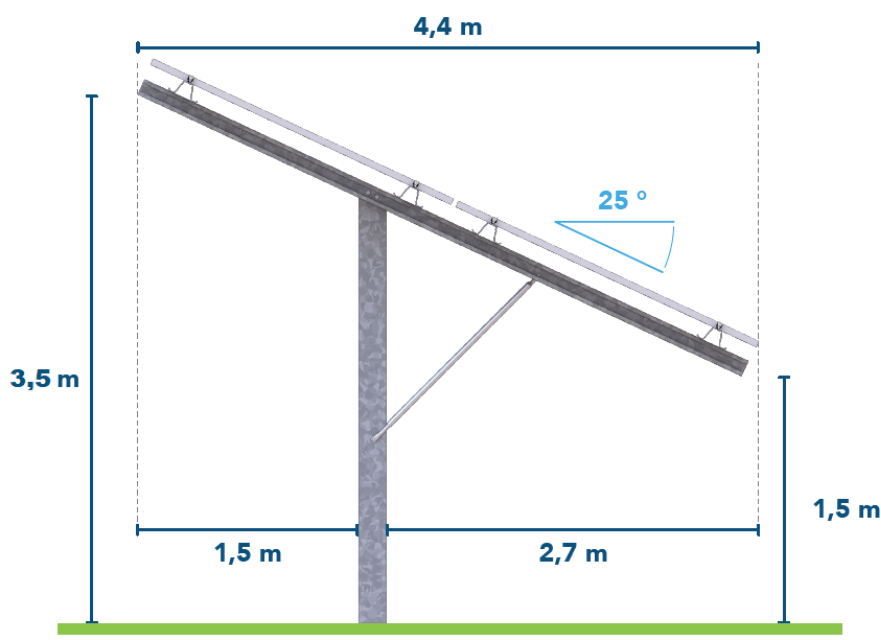


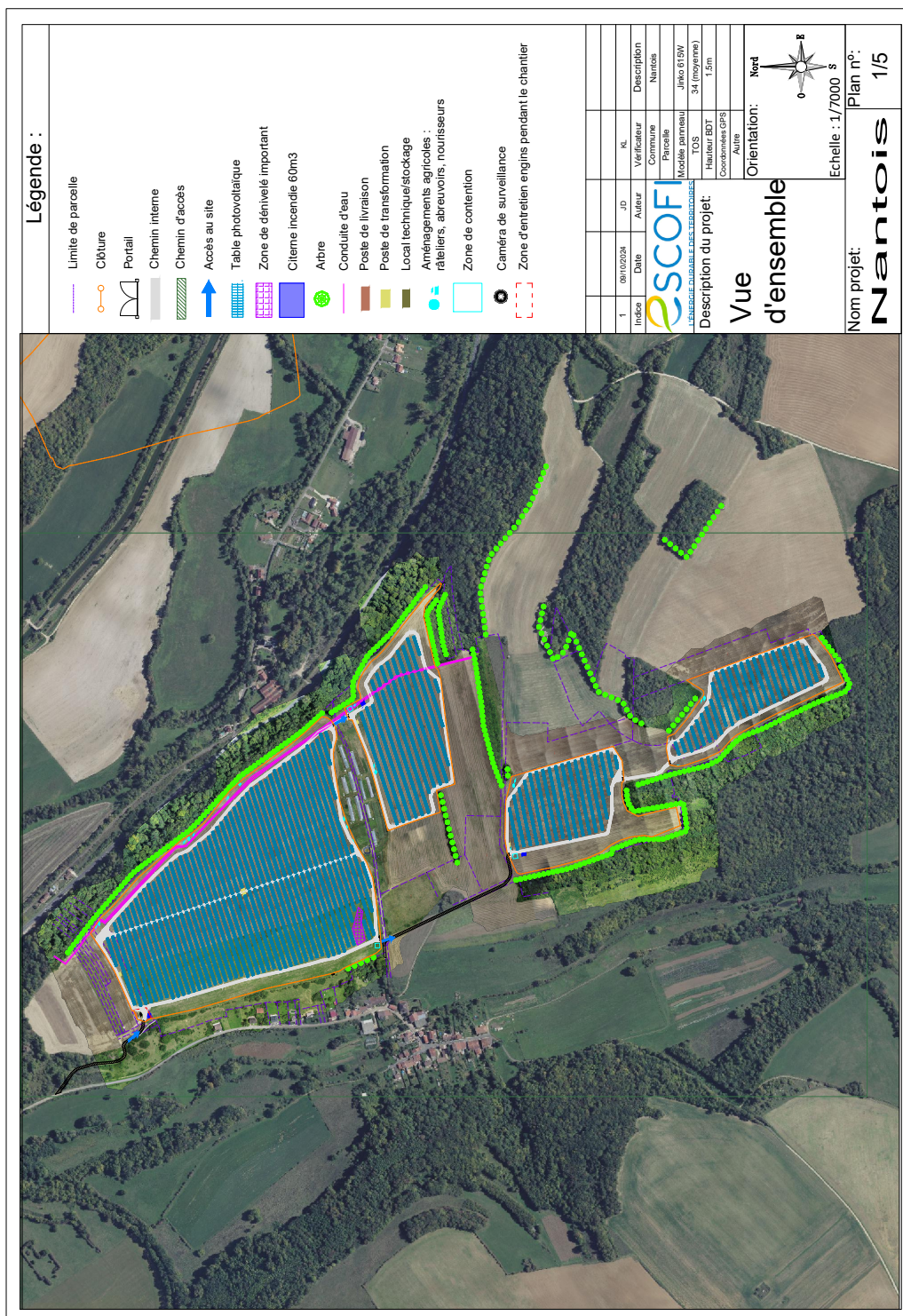
Figure 6. Structure fixe installée. (Source : Escofi)

L'implantation avec un pitch de 12 m sera installée dans la zone nord correspondant au CALCOSOL caillouteux.

L'implantation avec un pitch de 14,5 m sera installée dans la zone sud correspondant au CALCOSOL colluvial et au RENDOSOL.

Au nord et au sud, la hauteur du point bas est de 1,50 m, favorable à la production ovine et conforme aux recommandations de la FNO, et les largeurs inter-pieux sont respectivement de 12 m et 14,50 m, ce qui est totalement compatible avec la mécanisation agricole.

## IMPLANTATION RETENUE



## LA PRAIRIE

La prairie est une culture pérenne récoltée pour l'alimentation animale. Elle est généralement semée en mélange de graminées et de légumineuses pour offrir une alimentation équilibrée aux animaux.

La conduite de cette culture est relativement simple. Elle nécessite une bonne préparation du sol et un choix adapté des espèces à semer. La gestion de la fertilisation et des adventices est également importante pour assurer une production optimale.

Nous cherchons ensuite à récolter la prairie à différents stades de croissance en fonction des besoins des animaux. La récolte peut se faire sous forme de pâturage ou de fauche pour produire du foin ou de l'ensilage.

Comme pour les autres cultures fourragères, la récolte doit être suivie d'un stockage adapté pour conserver la qualité du fourrage et éviter les pertes.

### CYCLE GÉNÉRIQUE DE LA PRAIRIE

Les cycles des pousses de l'herbe suivent toujours une même dynamique :

- Une phase de démarrage assez lente,
- Une phase de forte croissance,
- Puis une phase de ralentissement, voire d'arrêt végétatif.

Pour l'herbe, une somme de températures (exprimée en degrés jours) se calcule en additionnant les moyennes quotidiennes à partir du 1<sup>er</sup> janvier pour la détermination de la date de la reprise de végétation et à partir du 1<sup>er</sup> février pour la détermination de la date de la fauche précoce avec un maximum de 18°C et un minimum de 0°C. Ces moyennes sont établies à partir des minima et maxima relevés par la station météorologique locale. Le zéro de végétation, considéré comme la température de base, est la température minimale dont une plante a besoin pour se croître. En dessous de cette température, la plante ne se développe pas. Cette température dépend de la plante. La somme de température est la quantité de chaleur dont une plante a besoin pour se développer.

**Tableau 1. Cycle de la prairie et facteurs climatiques**

| Période                                          | Effets climatiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Impact sur la prairie                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Période 1</b><br><b>01 janvier - 30 avril</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Reprise de végétation atteinte avec des feuilles de 10 à 15 cm, lorsque la somme des températures atteint <b>350°C jours</b> à partir du 1<sup>er</sup> février.</li><li>- Fauche précoce à <b>750°C jours</b>.</li><li>- Température, rayonnement et eau influencent la croissance.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- La pousse est marquée par la <b>mise à l'herbe</b> et la <b>fauche précoce</b>. Le <b>pic de production fourragère</b> est presque atteint au printemps.</li></ul> |



|                                                    |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Période 2</b><br><b>30 avril - 15 juin</b>      | - Après la fauche, une nouvelle reprise de végétation dépendant des mêmes facteurs : température, rayonnement et eau.<br>                                                                                                     | - Le <b>pic de production fourragère</b> est atteint pendant cette période.                                                                    |
| <b>Période 3</b><br><b>15 juin - 30 juillet</b>    | - À partir de juillet, les températures >25°C mettent la prairie en <b>repos végétatif</b> .<br>- Température, eau et rayonnement sont les facteurs clés pour la croissance estivale.                                         | - La prairie cesse de pousser en raison du <b>stress thermique</b> et du <b>manque d'eau</b> .                                                 |
| <b>Période 4</b><br><b>30 juillet - 31 octobre</b> | - En automne, la prairie reprend sa pousse, avec jusqu'à <b>25% de la production annuelle</b> si les fortes chaleurs estivales n'ont pas trop pénalisé.<br>- Le rayonnement, la température et l'eau influencent la repousse. | - <b>Bonne productivité automnale</b> possible si l'été n'a pas été trop pénalisant. Cependant, la <b>reprise est moindre</b> qu'au printemps. |

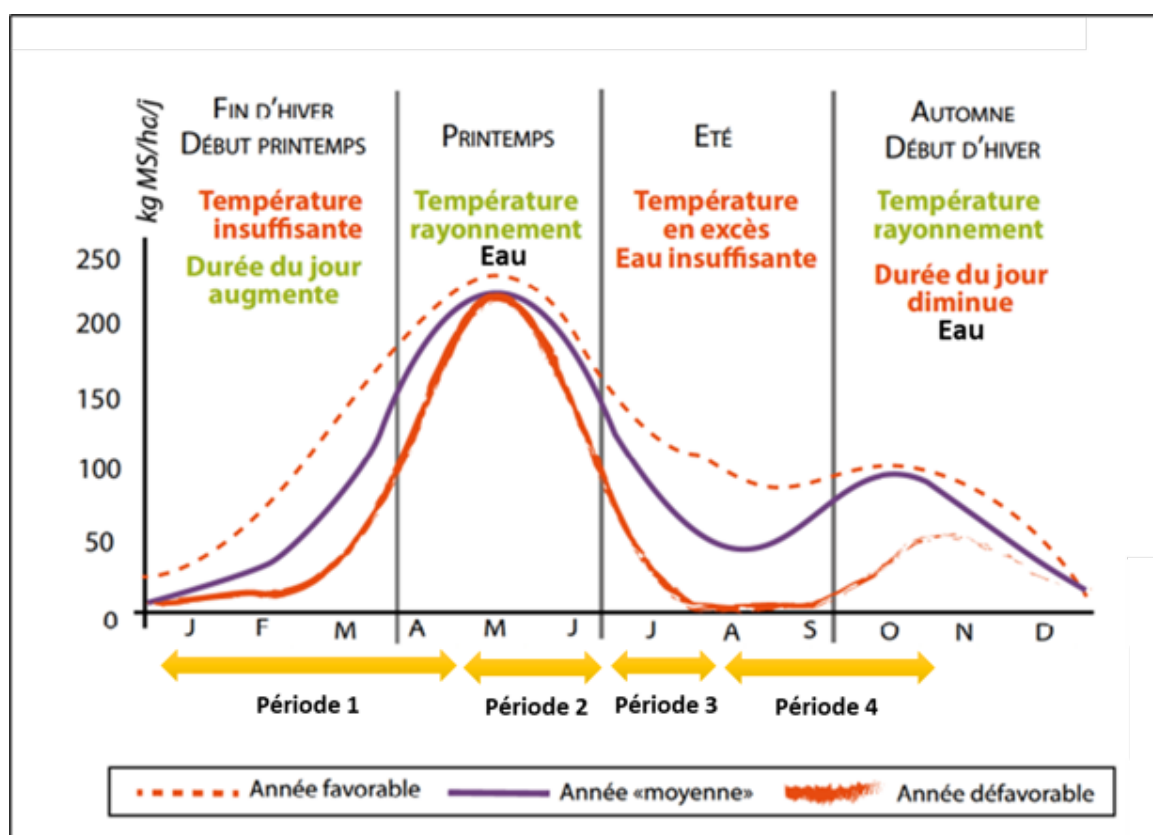


Figure 7. Evolution de la prairie en fonction des paramètres climatiques majeurs (Figure adaptée de Gilles LEMAIRE-INRAe)



### PATURAGE TOURNANT

L'objectif de l'exploitant est d'accueillir l'ensemble des ovins au sein d'un parcours de pâturage tournant réparti tout autour de son siège d'exploitation. Le pâturage tournant consiste à subdiviser la surface à pâturer en parcelles de petite taille, de manière à respecter un temps de présence de 2 à 5 jours par passage et un temps de repos de 20 à 25 jours au printemps ou 30 à 40 jours en été. En période d'agnelage, les brebis seront rentrées dans le bâtiment attenant aux parcelles pour un confort de travail et une meilleure surveillance des animaux.

La conduite en pâturage tournant présente de multiples avantages :

#### Meilleure gestion de l'herbe :

- Au printemps : pas de débordement, possibilité de faucher des paddocks.
- En été : meilleure gestion du coup de sec.

#### Intensification de la surface en herbe :

- Moins de refus.
- Parcelle densifiée.

#### Amélioration des performances animales :

- Herbe de qualité exploitée au bon stade.

#### Fertilisation à la baisse :

- Répartition homogène des déjections.
- Augmentation la composition des prairies en légumineuses.

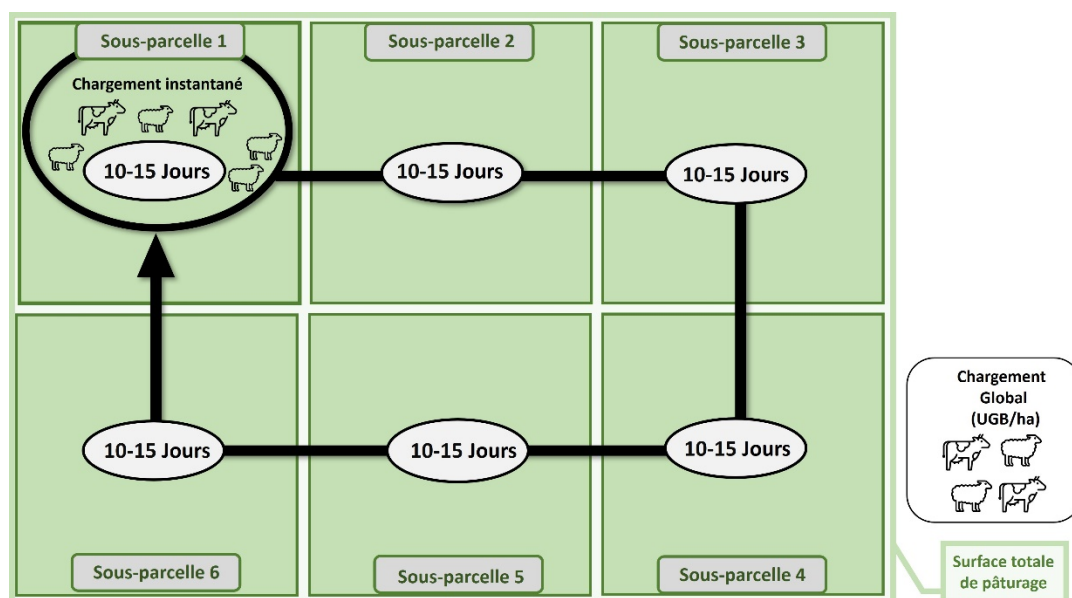


Figure 8. Principe du pâturage tournant simplifié. (Source : PC-Consult)

**Le temps global d'occupation d'une parcelle doit être suffisamment court pour qu'une herbe cisailée au début du temps d'occupation ne soit pas de nouveau broutée avant que les animaux quittent la parcelle.**

En pratique, le pâturage tournant se déroule de la manière suivante :

- **Février (Mise à l'herbe et premier tour) :** Déprimage de tous les paddocks et création du décalage de croissance de l'herbe entre les paddocks.
- **Avril (2<sup>ème</sup> tour) :** Le pâturage reprend sur le paddock pilote lorsque la hauteur de son herbe atteint 10 cm (au-delà de 15 cm<sup>1</sup>, il y a du gaspillage d'herbe). Une fois la surface de base pâturée, le tour continue sur la surface complémentaire et ne revient sur le paddock pilote que lorsque la hauteur de l'herbe atteint à nouveau 10 cm.
- **Mai-juin (3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> tour) :** C'est l'époque de la pleine pousse. Les paddocks de surface de base suffisent à l'alimentation du troupeau. Les paddocks complémentaires sont fauchés.
- **Juillet-août (5<sup>ème</sup> tour et suite) :** Avec la chaleur et le manque d'eau, les paddocks de la surface de base ne suffisent plus. On attaque alors la réserve d'herbe sur pied, c'est-à-dire l'herbe poussée courant juin après la fauche sur les paddocks complémentaires. A cette période, il faut allonger les intervalles de pâturage (30 à 35 jours).

## PERIODES CRITIQUES

Le tableau ci-dessous résume les effets climatiques sur les différentes phases du cycle des prairies :

**Tableau 2. Effets climatiques sur les différentes phases du cycle des prairies.**

| Phase                     | Effets climatiques                                                                                                                                                                                                                    | Impact sur la prairie                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Semis</b>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Printemps : Risque élevé de sécheresse estivale, compromettant le semis et la levée.</li> <li>- Automne : Moins exposé au risque de sécheresse mais dépendant des précipitations.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- En cas de semis au printemps, une sécheresse estivale peut pénaliser la levée.</li> <li>- Semis automnal plus sécurisé mais sensible aux conditions humides.</li> </ul>                         |
| <b>Reprise végétative</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation des températures : Reprise plus précoce de la pousse.</li> <li>- Pluies abondantes : Risque de saturation du sol, réduisant la portance et l'accès aux parcelles.</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pousse plus précoce, opportunité pour des fauches et pâtures anticipées.</li> <li>- Sols gorgés d'eau peuvent empêcher l'accès aux parcelles pour les travaux de pâturage ou fauche.</li> </ul> |
| <b>Repousse estivale</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sécheresse : Moins de précipitations et températures élevées augmentent l'évapotranspiration.</li> <li>- Fortes chaleurs : Arrêt potentiel de la productivité.</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baisse de productivité due à la sécheresse.</li> <li>- En cas de sécheresse sévère et prolongée, des dommages durables peuvent affecter la prairie.</li> </ul>                                  |

<sup>1</sup> 15 cm maximum à l'entrée et 5 cm à la sortie pour éviter les refus et le surpâturage.

|                               |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Repousse<br/>automnale</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gel : Arrêt de la croissance.</li> <li>- Diminution du nombre de jours de gel due au changement climatique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilité d'une période de croissance prolongée en automne si le gel est retardé, augmentant ainsi le potentiel de production automnale.</li> </ul> |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

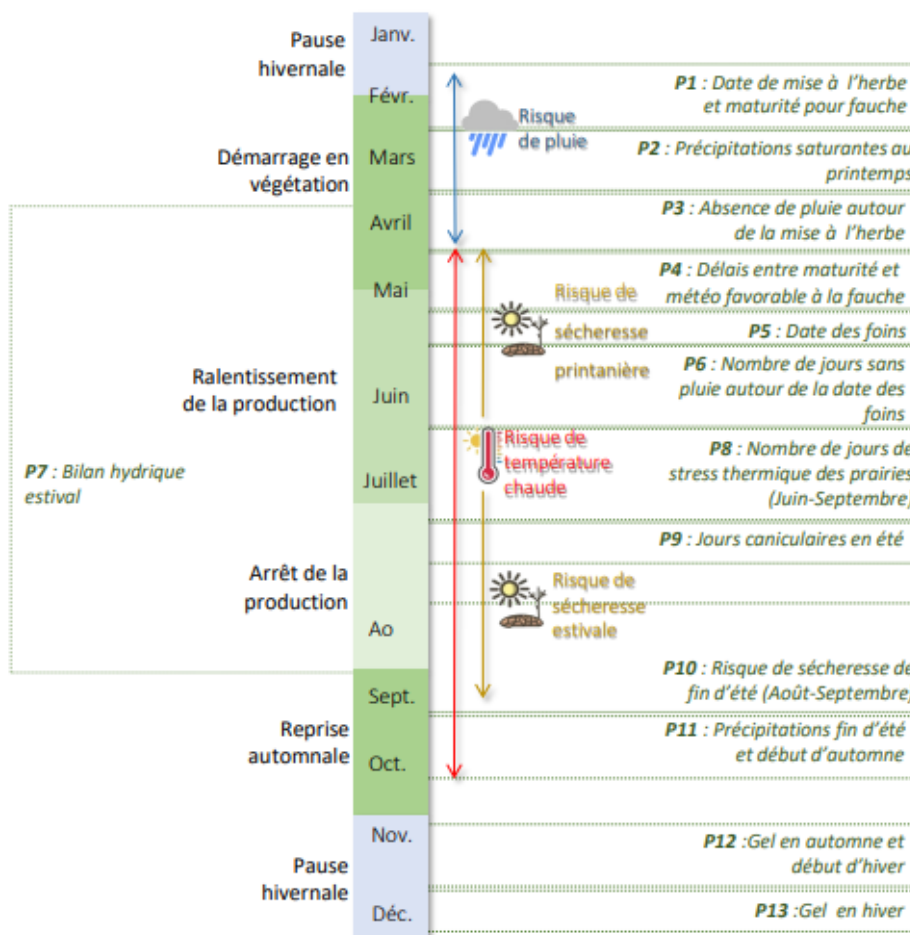


Figure 9. Risque abiotique en fonction des stades de développement de la prairie (Source : Chambre d'agriculture Pays de la Loire, Bretagne et Normandie)

## IMPACT DE LA SAISONNALITE SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE

Différents modèles développés par l'INRAe montrent que de nombreux paramètres influencent la pousse des végétaux. Trois facteurs primordiaux ont été identifiés :

- La température insuffisante ou excessive
- Le stress hydrique
- Le rayonnement

En situation normale, le rayonnement n'est généralement pas le facteur limitant et la quantité de biomasse varie en fonction de plusieurs facteurs climatiques (pluviométrie, températures, ...).

## LE SOL ET LE CLIMAT

Les parcelles du projet se situent à l'Est du village de Nantois (7 km au Sud de Ligny-en-Barrois). Celles-ci sont conduites en luzerne pendant 4 ans en rotation avec une céréale de vente. Au cours de l'étude, la zone était implantée intégralement en luzerne. L'altitude de la zone d'étude est comprise entre 270 et 335 m. La pente est en moyenne de 4 % avec des parties plus accentuées (25 à 50 %). Les parcelles ne présentent pas de cours d'eau en proximité directe.

---

### TYPES DE SOL

L'expertise agropédologique a été menée en 2023 par la CA Grand-Est. La levée de terrain a été conduite au moyen de sondages pédologiques (36), profils pédologiques (7) et d'analyses de terres végétales (7) :

- 6 types de sols sont identifiés sur la parcelle
- 3 types de sols majoritaires : calcosol caillouteux (40 %), calcosol colluvial (25%) et rendosol (19%).

Ces trois typologies occupent les situations topographiques les plus représentatives de la parcelle à savoir :

- Le plateau situé au Nord du secteur (calcosol caillouteux),
- Les hauts de pente au Sud de la parcelle (rendosol)
- Les versants pentus (calcosol colluvial) au Sud principalement et sur le pourtour du plateau Nord.

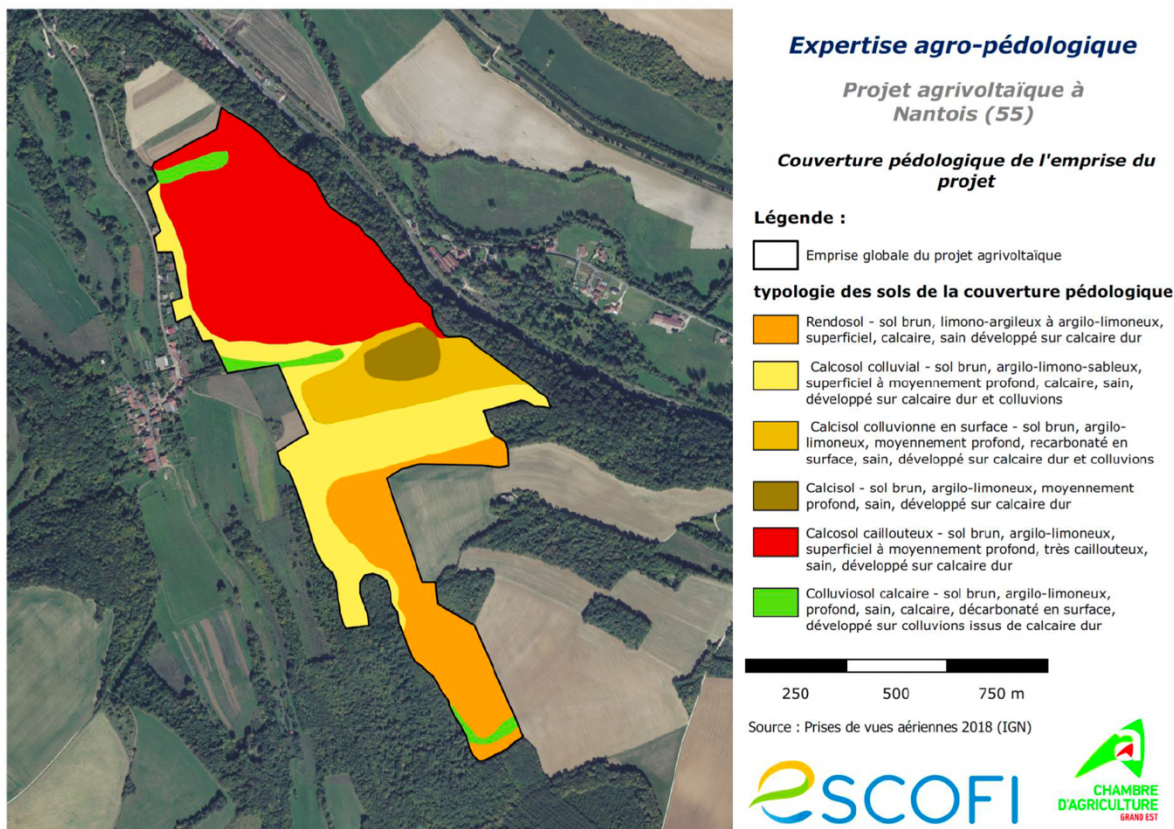


Figure 10. Types de sol dans la zone d'étude

## RU

Les valeurs de RU sont dans leur ensemble faibles :

- CALCOSOL CAILLOUTEUX : 40 mm
- CALCOSOL COLLUVIAL : 70 mm
- RENDOSOL : 60 mm

## POTENTIEL AGRONOMIQUE

L'estimation du potentiel agropédologique a été réalisée au moyen d'un outil d'aide à la décision (OAD) développé par la Chambre d'Agriculture Grand Est.

- **GRANDES CULTURES** : La quasi-totalité de la parcelle est associée à un potentiel très faible (calcosol caillouteux – 40 %) ou faible (rendosol, rendosol colluvial, calcisol colluvionné en surface – 54 %). Seules les zones associées au colluviosol calcaire et calcisol expriment un potentiel agropédologique élevé (6 %).
- **PRAIRIES** : La parcelle présente des potentiels dominants modérés (54%) et très faibles (40%) pour la production d'herbe du fait de l'importante couverture pédologique associée respectivement aux rendosols/calcosol colluvial/calcisol colluvionné en surface et au calcosol caillouteux.



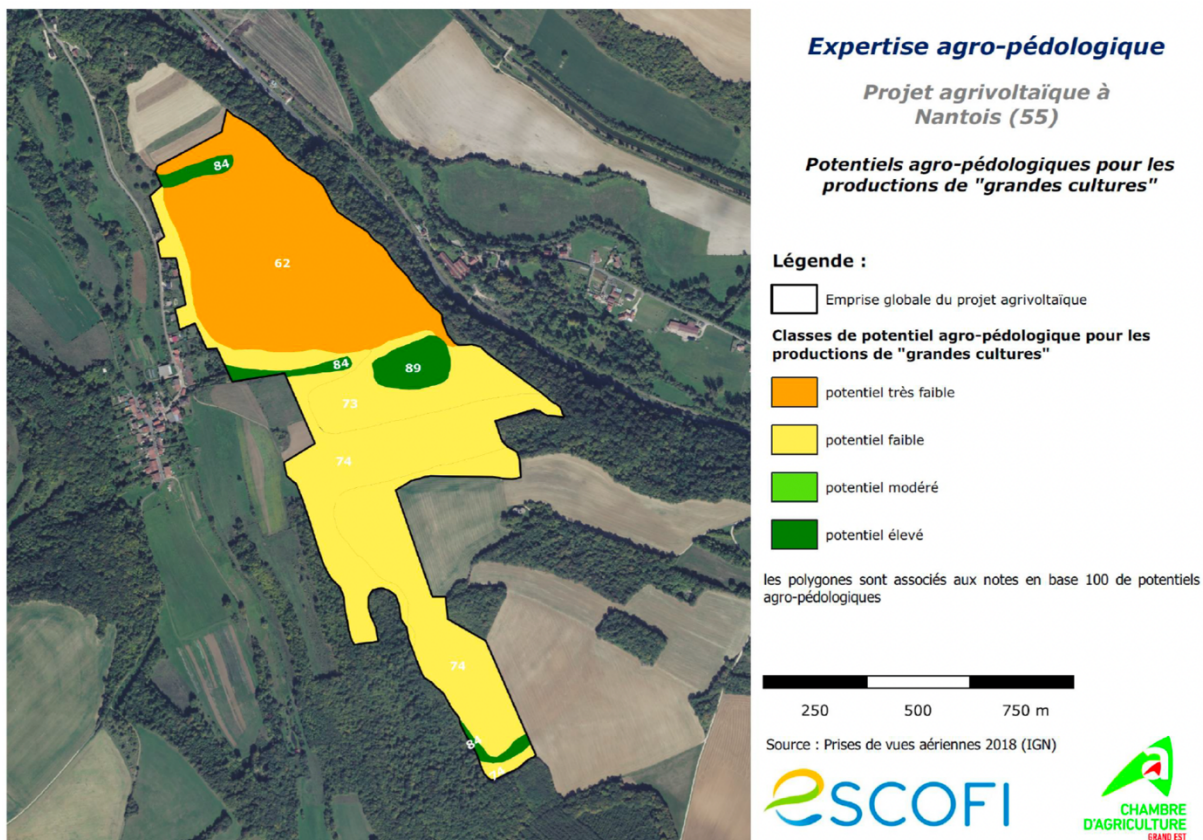


Figure 11. Potentiel agronomique de la zone d'étude "grandes cultures".

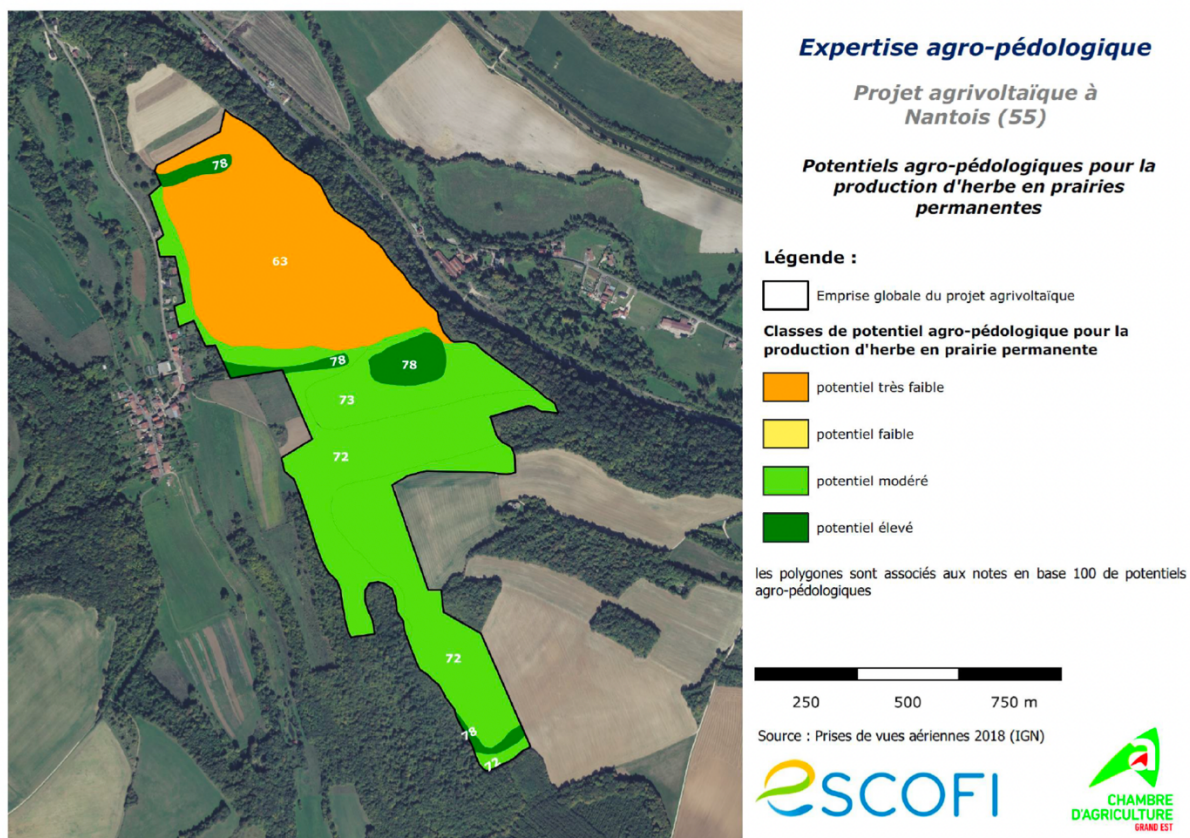


Figure 12. Potentiel agronomique de la zone d'étude "prairies".



**Le potentiel agronomique de la parcelle semble, selon l'étude de la CA Grand-Est, en adéquation avec une activité d'élevage et de production de fourrages. Les grandes cultures ne semblent pas adaptées.**

**Les valeurs de RU font peser un risque significatif de stress hydrique.**

## LE CLIMAT ACTUEL ET FUTUR

Les données climatiques typiques actuelles et futures géolocalisées à la zone d'étude sont présentées dans le diagramme ombrothermique ci-dessous.

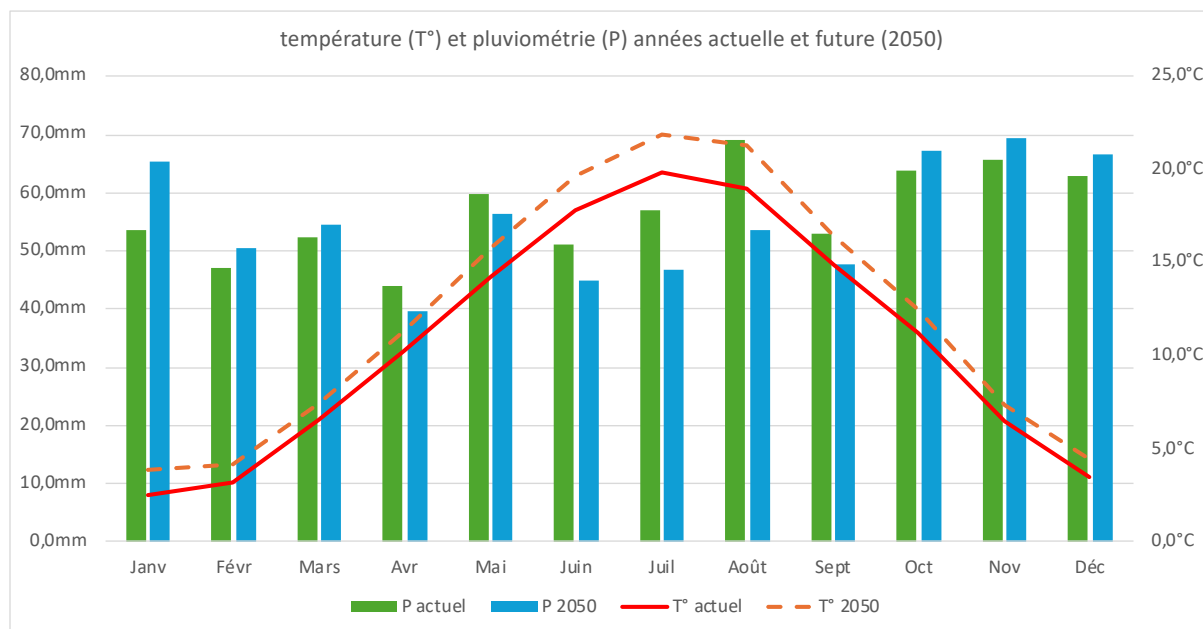


**Figure 13. Diagramme ombrothermique actuel et 2050. (Source : Météonorm)**

À horizon 2050, nous pouvons observer une hausse de la température moyenne annuelle de 1,4°C avec un pic à +2,3°C en août. En revanche, le volume de précipitation va rester stable, mais sera différemment réparti : + 28 mm d'octobre à mars et – 45 mm d'avril à septembre. Les précipitations seront donc réduites sur la période où les besoins hydriques des cultures sont les plus forts.

**D'ici à 2050, cette hausse de la température et la baisse des précipitations d'avril à septembre font peser un risque climatique sur la production prairiale de la zone d'étude.**

## ÉVOLUTION DES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES

Nous avons choisi de présenter les données issues du scénario RCP 4.5 c'est-à-dire le scénario intermédiaire en termes d'émission de gaz à effets de serre. Les chiffres présentés sont issus des projections climatiques régionales DRIAS 2020, publiées à l'automne 2020, qui incluent une sélection de 12 simulations identifiées comme les plus pertinentes sur le territoire français. Ces projections bénéficient en outre d'un ajustement statistique à partir des données observées du réseau Météo-France et permet également de proposer une résolution de 8km des projections climatiques.

**Tableau 3. Indices agroclimatiques de la zone d'étude (valeurs médianes). (Source : Climadiag)**

| Indicateur agroclimatique                                                   | Actuel | Futur proche (2050) | Différence |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------|------------|
| Pluviométrie annuelle en mm                                                 | 1046   | 1073                | +27        |
| Température moyenne annuelle en °C                                          | 9,82   | 10,69               | +0,9       |
| Nombre de jour de stress THI sur la période 01/02 au 31/10 (68 < THI < 150) | 74     | 87                  | +13        |
| Nombre de jours stress thermique sur la période 01/02 au 31/10 (T>25°C)     | 30,5   | 38                  | +8         |
| Déficit hydrique du 1/04 au 31/08                                           | -92,21 | -120,22             | -28        |
| Nombre de jours de pluies intenses par an (> 25 mm)                         | 4      | 4                   | =          |

D'après les projections des modèles climatiques sur le scénario RCP4,5 pour la zone de Nantois , on observe une augmentation de la température moyenne annuelle de 0,9°C, ce qui est élevé. D'ici 2050, on observe + 8 jours de stress thermique et + 13 jours de stress THI entre le 01/02 et le 31/10 ➔ Risque de stress thermique pour les animaux.

De plus, l'aggravation des risques climatiques sur le rendement agricole d'ici 2050 se caractérise par un déficit hydrique sur la période 1/03 au 30/07. En effet, on observe un risque climatique marqué notamment avec un déficit hydrique actuel de 92 mm et futur de 120 mm du 1 avril au 31 août ➔ Le risque de stress hydrique est déjà élevé pour la production agricole.

Sur la base de ces premiers éléments, le caractère d'adaptation aux risques climatiques semble justifié.

## EVOLUTION DES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES LOCAUX POUR LA PRAIRIE

Nous avons sélectionné sept indicateurs agroclimatiques pertinents concernant la prairie et nous regardons l'évolution dans un futur proche, soit 30 ans, période qui correspond à la durée du projet.

**Tableau 4. Evolution des indicateurs agroclimatiques dans le futur proche pour la zone de Nantois.**  
(Source : Climadiag et Agrisoleo)

| Espèces | Indicateurs                                                                                                                                   | Passé récent<br>2010 | Futur proche<br>2050 | Évolution      |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Prairie | Nombre de jours de gel                                                                                                                        | 57 jours             | 40 jours             | - 17 jours     |
|         | Dénombrement des jours durant lesquels la température maximale est au-dessus de 25 °C entre le 1 juin et le 31 août                           | 25 jours             | 37 jours             | + 12 jours     |
|         | Date de redémarrage de pousse de l'herbe                                                                                                      | 3 mars               | 18 février           | - 13 jours     |
|         | Date de la 1 <sup>ère</sup> mise à l'herbe                                                                                                    | 28 mars              | 18 mars              | - 10 jours     |
|         | Date de fauche précoce (foin)                                                                                                                 | 6 juin               | 30 mai               | - 7 jours      |
|         | Déficit hydrique en été (1 <sup>er</sup> juin au 30 août)                                                                                     | -82,5 mm             | -134,5 mm            | - 52 mm (+63%) |
|         | <b>Stress hydrique printemps</b><br>Nombre moyen de jours consécutifs sans pluie au printemps en dessous de 0 mm entre le 1 mars et le 31 mai | 8 jours              | 9 jours              | + 1 jour       |

## IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE POTENTIEL DE RENDEMENT FUTUR DE LA PRAIRIE

Le changement climatique entraine la modification de la saisonnalité de la production fourragère dans une gestion classique (hors pâturage tournant) :

**Tableau 5. Impact du changement climatique sur la prairie**

| Période                                     | Effets climatiques                                                                                  | Impact sur la production prairiale                                                               |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Période 1</b><br>01 janvier - 30 avril   | - Réduction du nombre de jours de gel : diminution de 30%                                           | - Réduction des risques liés au gel, favorable à la production                                   |
|                                             | - <b>Avancée du printemps</b> : redémarrage plus précoce de la pousse de l'herbe de <b>13 jours</b> | - Cycle de végétation décalé avec une reprise anticipée de la croissance de l'herbe              |
| <b>Période 2</b><br>30 avril - 15 juin      | - <b>Augmentation du risque de stress hydrique et thermique</b>                                     | - Épuisement plus rapide de la réserve hydrique du sol, défavorisant la production de la prairie |
|                                             | - Hausse de l'évapotranspiration                                                                    |                                                                                                  |
|                                             | - <b>Augmentation des besoins en eau</b>                                                            |                                                                                                  |
| <b>Période 3</b><br>15 juin - 30 juillet    | - <b>Stress hydrique accru</b>                                                                      | - Creux estival plus prononcé et prolongé, croissance difficilement anticipable                  |
|                                             | - <b>Températures &gt;25°C fréquentes</b>                                                           |                                                                                                  |
|                                             | - Arrêt de la croissance de la prairie                                                              |                                                                                                  |
| <b>Période 4</b><br>30 juillet - 31 octobre | - <b>Stress hydrique et thermique élevé</b>                                                         | - Reprise tardive et faible production d'herbe à l'automne                                       |
|                                             | - Retard de la reprise de la pousse d'herbe                                                         |                                                                                                  |

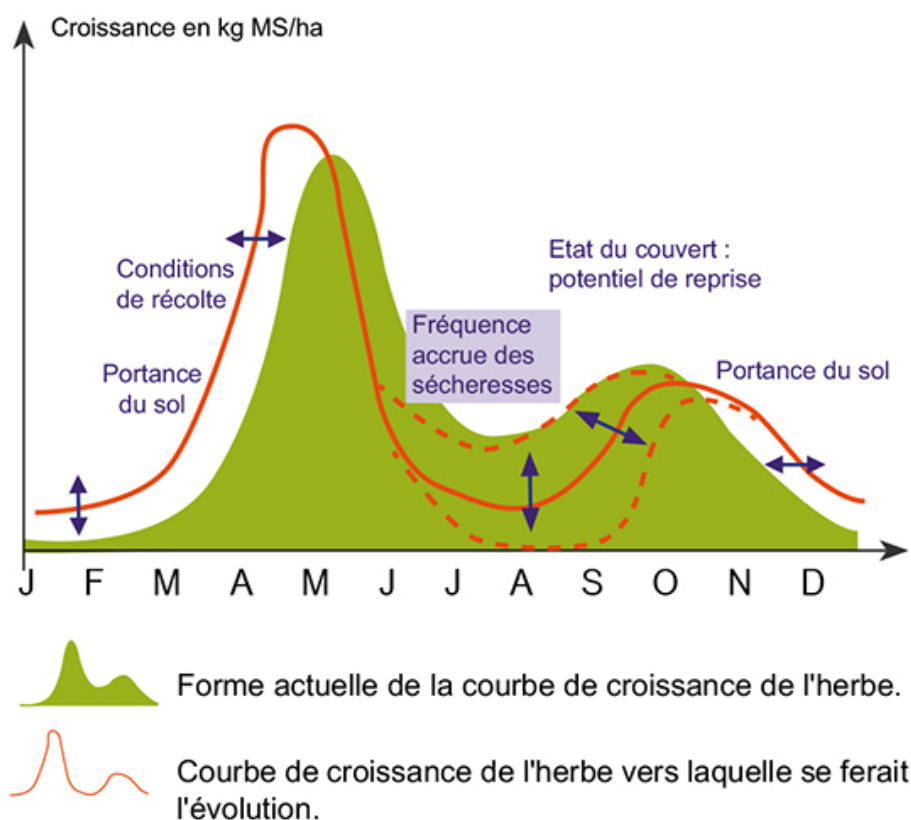


Figure 14 : Simulations à l'horizon 2050 réalisées dans le cadre du programme changements climatiques, pilotés par l'institut de l'élevage (Source : Idele)

Sur la zone d'étude, l'impact du changement climatique sur la production de biomasse de la prairie sera positif à la sortie d'hiver et au début du printemps vu que le nombre de jours de gel va diminuer. Au printemps, l'effet du changement climatique impactera négativement la production prairiale avec la hausse du risque de stress thermique et hydrique à la suite d'un épuisement plus rapide de la réserve hydrique du sol, cela est d'autant plus vrai que la réserve utile du sol est faible tel que dans le CALCOSOL caillouteux. L'arrêt de croissance de la prairie impactera le rendement automnal avec la hausse du risque de stress hydrique et thermique en été.

## IMPACT DE LA CENTRALE AGRIVOLTAÏQUE SUR LES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES PREDEFINIS

L'impact du projet sur les indicateurs agroclimatiques est évalué (tableau ci-dessous) :

**Tableau 6. Impact de la structure agrivoltaïque sur les indicateurs agroclimatiques**

| Indicateurs agroclimatiques                                                                                                         | Impact de la structure agrivoltaïque                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre de jours de gel par an (nb jours/an)                                                                                         | Réduction du refroidissement nocturne par rayonnement <sup>2</sup><br>Réduction du nombre de jours de gel                                                                                |
| Date de redémarrage de la pousse de l'herbe (date à laquelle est atteint le seuil de 200°CJ initialisé au 1 <sup>er</sup> janvier)  | Apport de la fraîcheur par les panneaux et recul de la date de reprise de la pousse de l'herbe.                                                                                          |
| Date de fauche précoce (date à laquelle est atteint le seuil de 750°CJ initialisé au 1 <sup>er</sup> février)                       | Recul de la date de fauche précoce suite à l'apport de la fraîcheur sous les panneaux.                                                                                                   |
| Stress thermique estival (nombre de jours avec des températures maximales Tx strictement supérieures à 25°C de mi-mai à mi-juillet) | Apport de fraîcheur grâce à l'ombrage<br>Diminution du stress thermique pour la prairie<br>Augmentation du confort animal par la baisse du ITH                                           |
| Stress hydrique estival (nombre de séquences de 10 jours consécutifs sans pluie de mai à août)                                      | Diminution de l'évapotranspiration grâce à l'ombrage <sup>3</sup><br>Réduction du déficit hydrique du sol<br>Meilleure efficacité de l'utilisation de la ressource hydrique <sup>2</sup> |
| Apports pluviométriques                                                                                                             | Hétérogénéité moyenne des apports pluviométriques du fait des panneaux fixes, malgré la transparence hydrique des modules.                                                               |

<sup>2</sup> Touil, S., Richa, A., Fizir, M., & Bingwa, B. (2021). Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: A mini review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(2), 281-296.

<sup>3</sup> Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system?. *European Journal of Agronomy*, 50, 38-51.



# ÉVALUATION DES IMPACTS AGRONOMIQUES

## TEMPERATURE

Les plantes ont un optimum de températures pour la croissance qui se situe entre 18 et 25 °C selon les espèces. Avec des chaleurs plus élevées, les plantes ralentissent puis stoppent leur photosynthèse et leur croissance. Ce maximum se situe autour de 25 °C pour les ray-grass et de 30 °C pour les dactyles, fétuques ou luzerne. Le trèfle violet est à un niveau intermédiaire. Ces températures maximales sont modulées par la disponibilité en eau. En-dessous de 0°C, la croissance de la prairie est stoppée.

35 jours en zone témoin / 19 jours en zone agriPV ➔ - 16 j

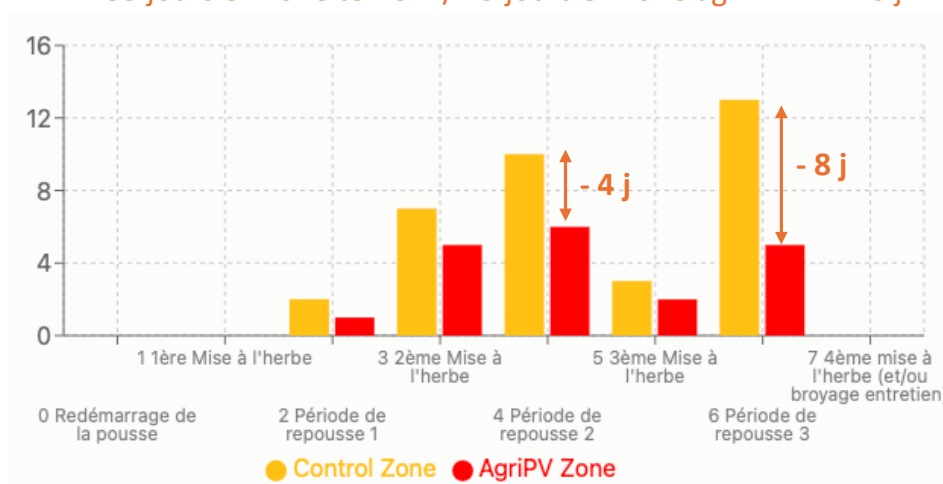


Figure 15. Nombre de jours >25°C en zone témoin et agriPV pour une année actuelle. (Source : Agrisoleo)

26 jours en zone témoin / 13 jours en zone agriPV ➔ - 13 j

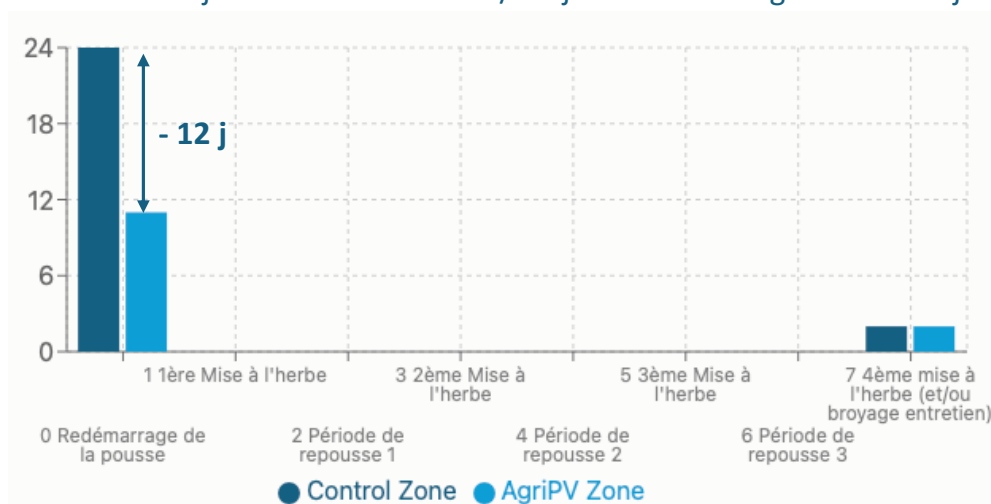


Figure 16. Nombre de jours <0°C en zone témoin et agriPV pour une année actuelle. (Source : Agrisoleo)

65 jours en zone témoin / 39 jours en zone agriPV → - 26 j

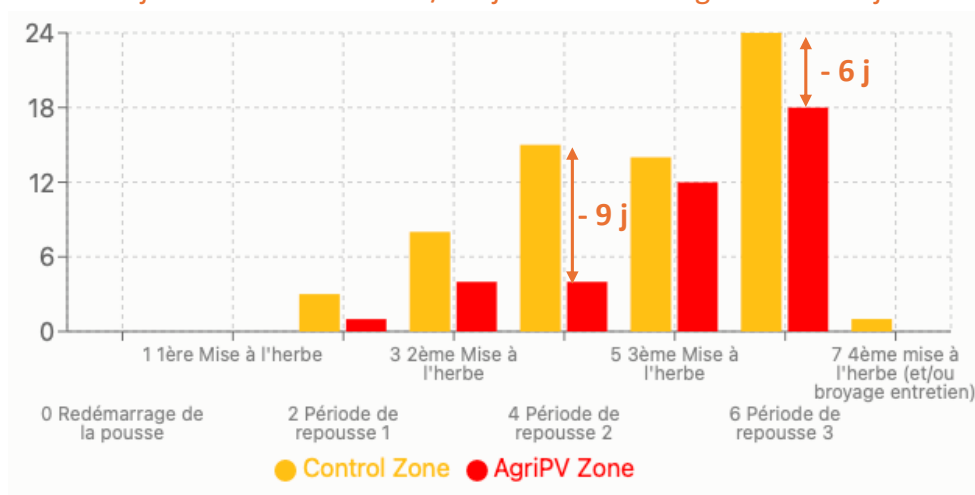


Figure 17. Nombre de jours >25°C en zone témoin et agriPV en 2050. (Source : Agrisoleo)

14 jours en zone témoin / 10 jours en zone agriPV → - 4 j

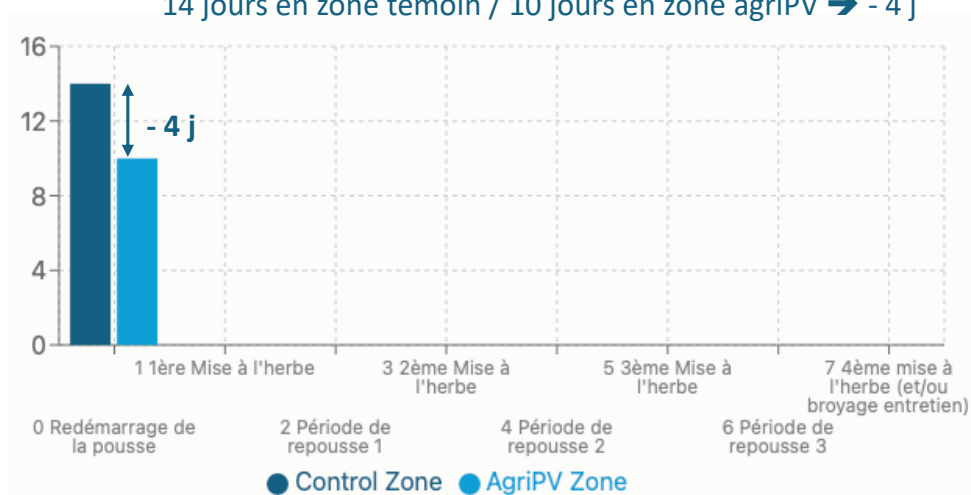


Figure 18. Nombre de jours <0°C en zone témoin et agriPV en 2050. (Source : Agrisoleo)

Nous pouvons observer une baisse significative du nombre de jours de gel en zone témoin entre une année actuelle et 2050, - 13 jours, alors que le nombre de jours avec une température >25°C augmente de 30 jours. En année actuelle, la prairie subira un stress thermique pendant 35 jours contre 65 jours en 2050.

Dans les deux scénarii, la structure aura un impact significatif sur la baisse du nombre de jours de gel en zone agriPV, - 13 j actuellement et - 4 j en 2050, ce qui aura un effet favorable pour le redémarrage de la prairie. La structure réduira le risque de stress thermique avec la baisse du nombre de jours avec une température >25°C, - 16 j actuellement et - 26 j en 2050, notamment lors des phases de repousses.

**Pour les deux scénarii, la structure agrivoltaïque améliore les conditions thermiques pour la croissance de la prairie lors du démarrage par la baisse du risque de gel et lors des phases de repousse par la baisse du risque de jours chauds.**

## RAYONNEMENT

### ZONE NORD

| Irradiance en % |                    |                  |             |
|-----------------|--------------------|------------------|-------------|
| Zone témoin     | Zone sous panneaux | Zone inter-rangs | Zone agriPV |
| 100%            | 49.35%             | 79.3%            | 68.49%      |

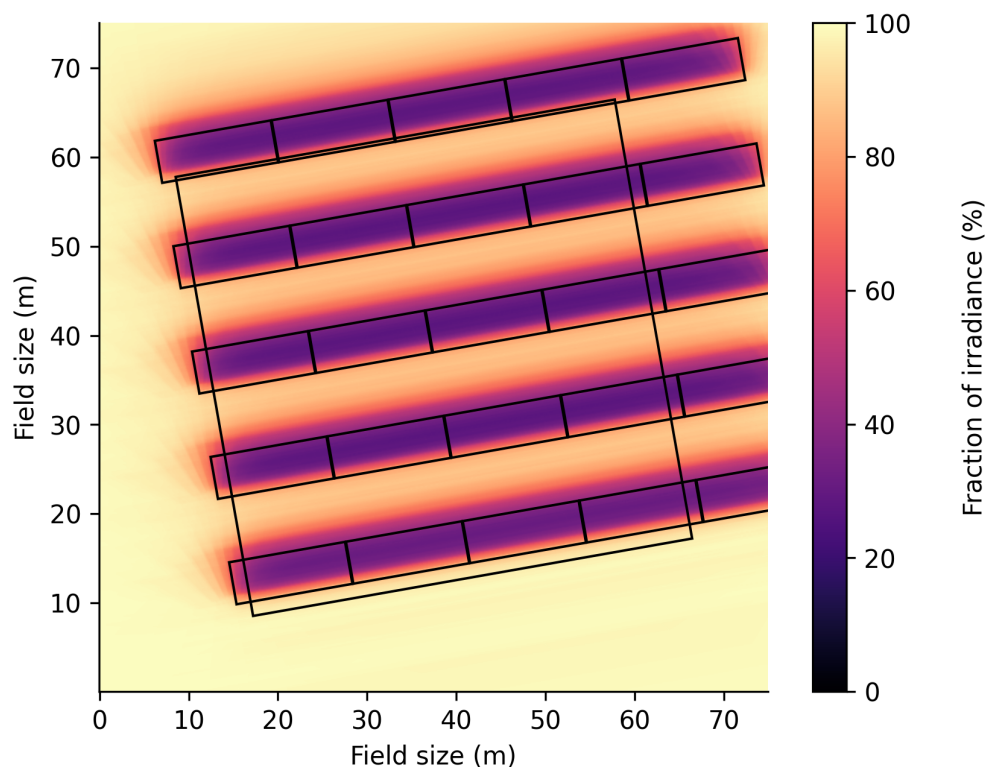


**Figure 19** Carte de la fraction de rayonnement reçu au sol pour une année météorologique typique actuelle en zone nord. (Source : Agrisoleo)

Nous observons que le rayonnement reçu au sol est en moyenne de 68,5% en zone agrivoltaïque, et varie de 49,3% en zone sous-panneaux à 79% en zone inter-rang. L'homogénéité de l'ombrage est faible, il y a de grosses variations entre les zones, allant jusqu'à 40% lors de la 2<sup>ème</sup> période de repousse au cours du mois de juin. Cela induit une hétérogénéité de la biomasse prairiale produite.

| Irradiance en % |                    |                  |             |
|-----------------|--------------------|------------------|-------------|
| Zone témoin     | Zone sous panneaux | Zone inter-rangs | Zone agriPV |
| 100%            | 50.11%             | 83.81%           | 73.74%      |

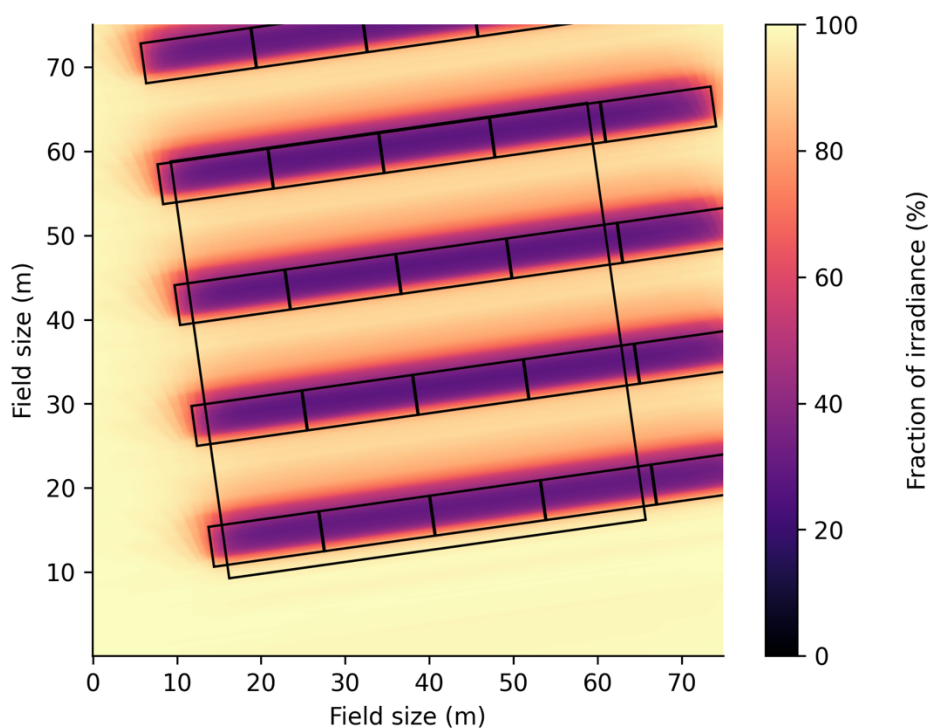


**Figure 20** Carte de la fraction de rayonnement reçu au sol pour une année météorologique typique actuelle en zone sud. (Source : Agrisoleo)

Nous observons que le rayonnement reçu au sol est en moyenne de 73% en zone agrivoltaïque, et varie de 50% en zone sous-panneaux à 84% en zone inter-rang. L'homogénéité de l'ombrage est faible, il y a de grosses variations entre les zones, allant jusqu'à 38% lors de la 2<sup>ème</sup> période de repousse au cours du mois de juin. Cela induit une hétérogénéité de la biomasse prairiale produite.

## DEFICIT HYDRIQUE

### REPLISSAGE DE LA RESERVE UTILE EN ANNEE ACTUELLE

Nous simulons le remplissage de la réserve utile (ou stock d'eau) en zone témoin, en zone sous panneaux, en zone inter-rang et en zone agriPV pour une année typique actuelle.

Sur ces simulations nous observons qu'à chaque fois que la réserve se vide, les zones inter-rang sous panneaux et agriPV se vident moins rapidement qu'en zone témoin. Néanmoins, avec la RFU faible du CALCOLSOL caillouteux en zone nord, l'effet protecteur de la structure PV sur l'eau disponible dans le sol pour les plantes est plus limité et la prairie va se trouver en situation de confort hydrique en zone agriPV jusqu'au début de la 2<sup>ème</sup> mise à l'herbe, alors que la zone témoin sera en stress dès la 1<sup>ère</sup> mise à l'herbe. En zone sud, dans le RENDOSOL, la prairie va commencer à subir du stress à partir de la 3<sup>ème</sup> pousse de l'herbe, contrairement à la zone témoin (=zone de contrôle) qui sera stressée dès la fin de la 1<sup>ère</sup> pousse. Pour le CALCOSOL colluvial, dans la RFU est la plus élevée, la prairie sera faiblement impactée par le stress hydrique en zone agriPV, alors que la prairie témoin subira du stress dès la 2<sup>ème</sup> repousse à des intensités plus ou moins sévères.

Ci-dessous, sont présentés les résultats pour les 3 sols dans les 2 zones :

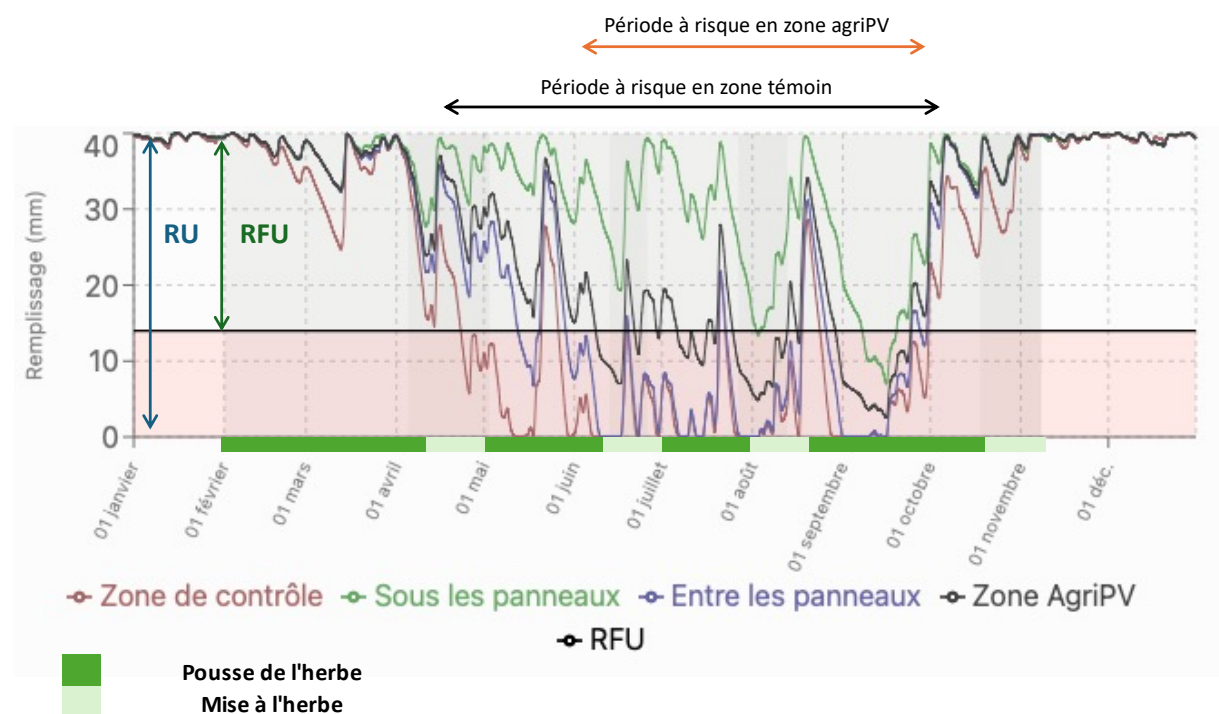


Figure 21. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en mm en zone nord (CALCOSOL caillouteux). (Source : Agrisoleo)

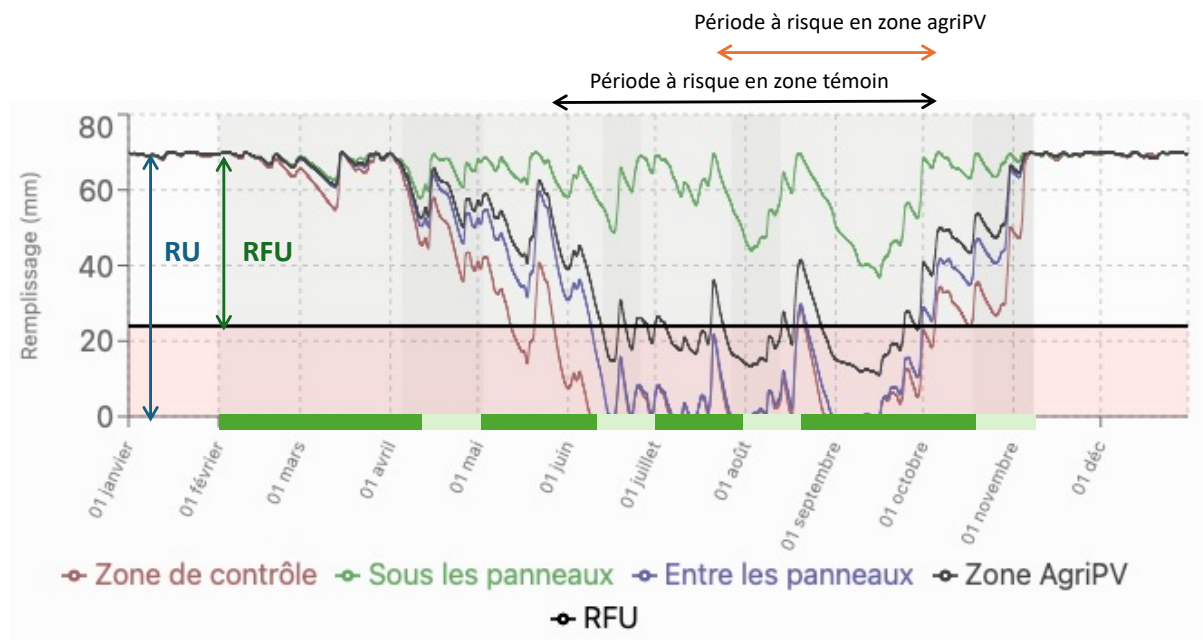


Figure 22. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en mm en zone sud (CALCOSOL colluvial). (Source : Agrisoleo)

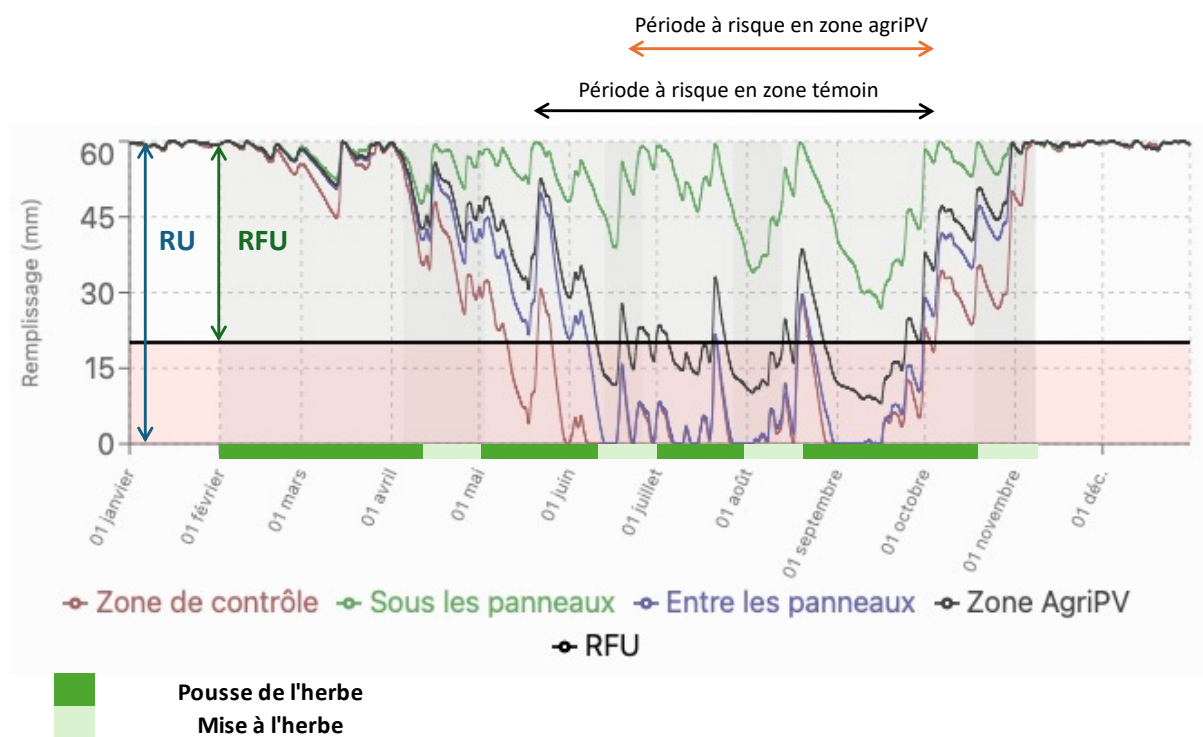


Figure 23. Remplissage de la réserve utile (RU) journalière en zone sud (RENDOSOL). (Source : Agrisoleo)

La structure photovoltaïque permet de retarder et de raccourcir les épisodes de stress hydrique.

Le remplissage de la RU du sol en zone témoin traduit bien la dynamique des précipitations puisque la période hivernale permet de la recharger et la demande des plantes est encore



faible. En revanche, dès que la demande climatique et que les précipitations deviennent plus faibles à partir de juin, la RU en zone témoin se vide très rapidement et peine à se recharger, contrairement à la zone agriPV dont la demande climatique est diminuée grâce à l'ombrage. Néanmoins, l'effet de la structure est plus limité pour des valeurs de RFU faibles.

**Les panneaux de l'installation agrivoltaïque permettent une protection contre le stress hydrique. Ils offrent donc une protection contre le déficit hydrique par rapport à un sol sans PV en retardant l'apparition de stress hydrique fort. La RU se vide moins vite en zone agriPV.**

## NOMBRE DE JOURS EN DEFICIT HYDRIQUE EN ANNEE ACTUELLE

A partir du remplissage de la réserve utile nous simulons le nombre de jours en déficit hydrique. Sachant que le remplissage de la réserve utile se vide toujours plus vite en zone témoin que sous les panneaux. Sur le cycle de la prairie, la baisse du nombre de jours de stress hydrique en zone agriPV va de -36% dans le CALCOSOL colluvial à -46% dans le CALCOSOL caillouteux.

**Tableau 7. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Nord – CALCOSOL caillouteux**

| Période                                                  | Date début | Date fin | Témoin | AgriPV | Écart |
|----------------------------------------------------------|------------|----------|--------|--------|-------|
| <b>Année</b>                                             | 1-janv.    | 31-déc.  | 157    | 84     | -46%  |
| <b>0 - Redémarrage de la pousse</b>                      | 1-févr.    | 05-avr.  | 0      | 0      |       |
| <b>1 - 1ère Mise à l'herbe</b>                           | 05-avr.    | 03-mai   | 13     | 0      | -100% |
| <b>2 - Période de repousse 1</b>                         | 03-mai     | 13-juin  | 38     | 6      | -84%  |
| <b>3 - 2ème Mise à l'herbe</b>                           | 13-juin    | 26-juin  | 14     | 9      | -36%  |
| <b>4 - Période de repousse 2</b>                         | 26-juin    | 27-juil. | 30     | 20     | -33%  |
| <b>5 - 3ème Mise à l'herbe</b>                           | 27-juil.   | 13-août  | 18     | 18     | 0%    |
| <b>6 - Période de repousse 3</b>                         | 13-août    | 18-oct.  | 44     | 31     | -30%  |
| <b>7 - 4ème mise à l'herbe (et/ou broyage entretien)</b> | 18-oct.    | 08-nov.  | 0      | 0      |       |

**Tableau 8. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Sud – RENDOSOL**

| Période                                                  | Date début | Date fin | Témoin | AgriPV | Écart |
|----------------------------------------------------------|------------|----------|--------|--------|-------|
| <b>Année</b>                                             | 1-janv.    | 31-déc.  | 146    | 90     | -38%  |
| <b>0 - Redémarrage de la pousse</b>                      | 1-févr.    | 05-avr.  | 0      | 0      |       |
| <b>1 - 1ère Mise à l'herbe</b>                           | 05-avr.    | 03-mai   | 0      | 0      |       |
| <b>2 - Période de repousse 1</b>                         | 03-mai     | 13-juin  | 28     | 0      | -100% |
| <b>3 - 2ème Mise à l'herbe</b>                           | 13-juin    | 26-juin  | 14     | 10     | -29%  |
| <b>4 - Période de repousse 2</b>                         | 26-juin    | 27-juil. | 32     | 25     | -22%  |
| <b>5 - 3ème Mise à l'herbe</b>                           | 27-juil.   | 13-août  | 18     | 18     | 0%    |
| <b>6 - Période de repousse 3</b>                         | 13-août    | 18-oct.  | 54     | 37     | -31%  |
| <b>7 - 4ème mise à l'herbe (et/ou broyage entretien)</b> | 18-oct.    | 08-nov.  | 0      | 0      |       |

**Tableau 9. Nombre de jours en déficit hydrique Zone Sud – CALCOSOL colluvial**

| Période                                                  | Date début | Date fin | Témoin | AgriPV | Écart |
|----------------------------------------------------------|------------|----------|--------|--------|-------|
| <b>Année</b>                                             | 1-janv.    | 31-déc.  | 142    | 91     | -36%  |
| <b>0 - Redémarrage de la pousse</b>                      | 1-févr.    | 05-avr.  | 0      | 0      |       |
| <b>1 - 1ère Mise à l'herbe</b>                           | 05-avr.    | 03-mai   | 0      | 0      |       |
| <b>2 - Période de repousse 1</b>                         | 03-mai     | 13-juin  | 30     | 4      | -87%  |
| <b>3 - 2ème Mise à l'herbe</b>                           | 13-juin    | 26-juin  | 14     | 10     | -29%  |
| <b>4 - Période de repousse 2</b>                         | 26-juin    | 27-juil. | 31     | 23     | -26%  |
| <b>5 - 3ème Mise à l'herbe</b>                           | 27-juil.   | 13-août  | 18     | 18     | 0%    |
| <b>6 - Période de repousse 3</b>                         | 13-août    | 18-oct.  | 49     | 36     | -27%  |
| <b>7 - 4ème mise à l'herbe (et/ou broyage entretien)</b> | 18-oct.    | 08-nov.  | 0      | 0      |       |

**La présence de l'installation agrivoltaïque réduit le nombre de jours de stress hydrique en zone agriPV par rapport au témoin.**

## **SIMULATION DE PRODUCTION RECOLTABLE**

Nous présentons ci-dessous l'évaluation du rendement récoltable de la prairie selon le modèle décrit par ailleurs et prenant en compte les hypothèses suivantes :

- Dans le cas d'un pâturage tournant, le cycle est modélisé par une alternance de cycles de pâture et de repos, avec une réinitialisation de l'indice foliaire au début du stade de repos. Le coefficient cultural  $Kc^4$  est fixé à 1, sauf pendant la période estivale, où il est réduit à 0.6.
- La prairie est composée uniquement de ray-grass, parfaitement homogène, bien implantée et enracinée.
- Elle est non concurrencée par des adventices et indemne de ravageurs et de maladies
- Les deux seuls facteurs principaux de variation de la production récoltable sont le stress hydrique et l'irradiance.
- La nutrition azotée est considérée comme non limitante. (En condition de nutrition azotée limitante, la prairie sera moins productive).
- On considère qu'à partir 1500 DJ sans repos, la prairie ne produit plus de matière sèche.

**La production récoltable calculée est donc un potentiel de production, mais les dynamiques de croissance sont représentatives d'une prairie réelle (augmentation ou baisse de production).**

---

<sup>4</sup> Le coefficient cultural ( $Kc$ ) permet de corriger l'ETP suivant une culture donnée et son stade de développement. Ainsi, plus la culture est développée d'un point de vue végétatif, plus le  $Kc$  approche de 1, et à ce moment là l'ETP équivaut à l'ETM. Le  $Kc$  est calculé suivant les cultures et leur cycle de développement.

## DYNAMIQUE DE POUSSE DE L'HERBE EN ANNÉE ACTUELLE

La dynamique de pousse de l'herbe sur les 3 types de sol en année moyenne actuelle est présentée ci-dessous.

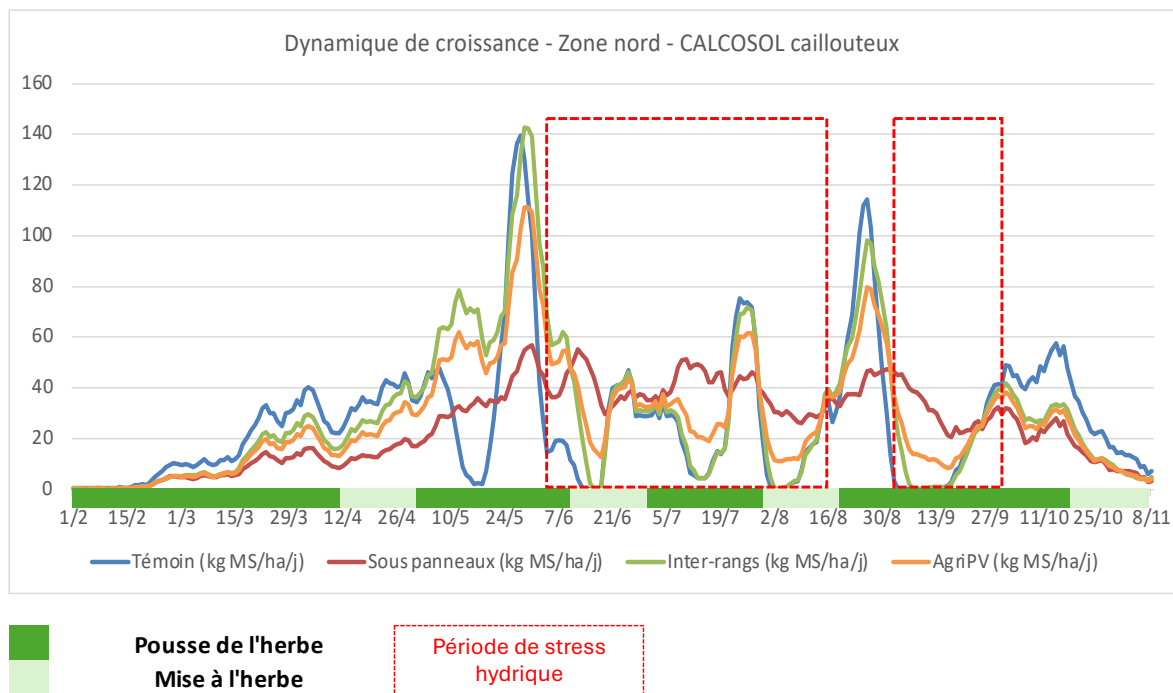


Figure 24 Dynamique de la pousse de l'herbe dans le CALCOSOL caillouteux au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle.

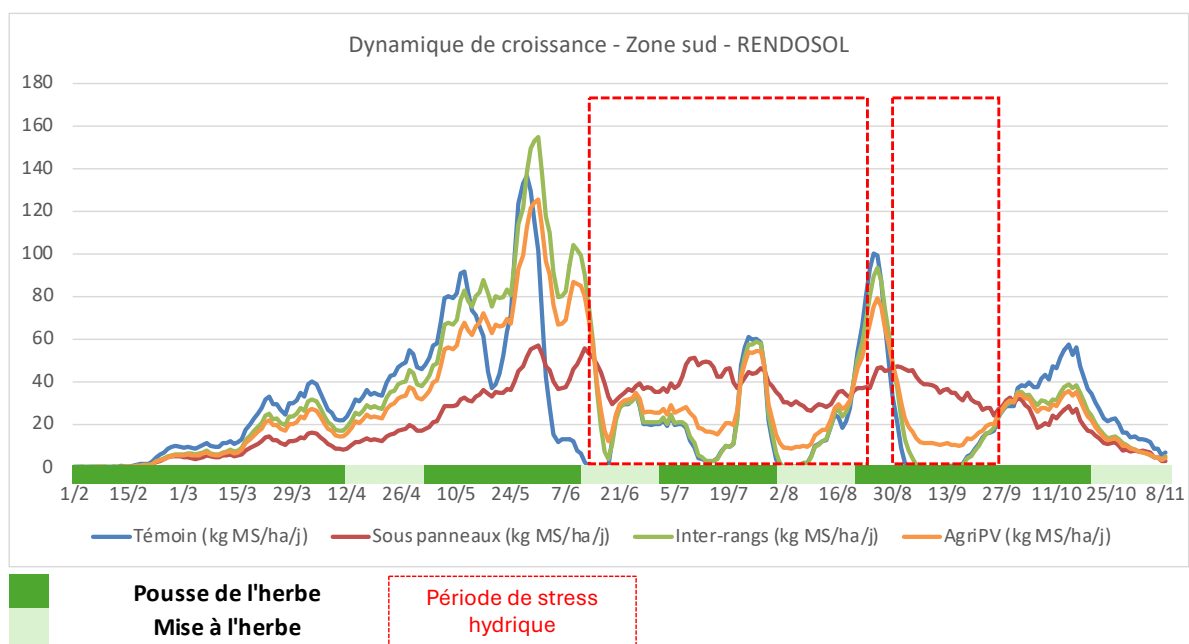


Figure 25 Dynamique de la pousse de l'herbe dans le RENDOSOL au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle.

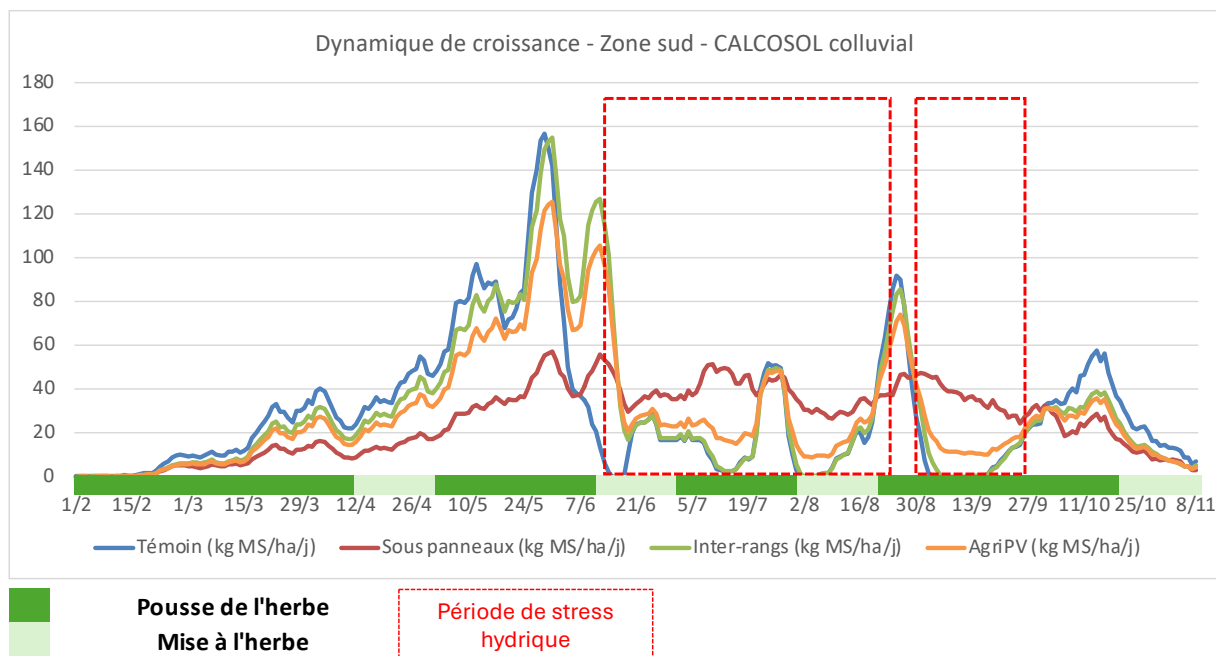


**Figure 26** Dynamique de la pousse de l'herbe dans le CALCOSOL colluvial au cours du cycle de production de la prairie, pour une année météorologique typique actuelle.

Nous observons :

- 1 :** Pour les 3 types de sol, peu résilients au stress hydrique, un retard de productivité en zone agriPV au printemps. La structure agriPV limite l'amplitude des variations de la productivité du au stress hydrique montrant une meilleure résilience face à la sécheresse.
- 2 :** Pour les 3 types de sol, un allongement et une régularité de la période de pousse estivale en zone agriPV. La structure permet de rallonger et de d'homogénéiser la période de pousse estivale. Elle assure une productivité de la prairie en zone agriPV sur toute sa durée d'exploitation, alors que la productivité est régulièrement nulle en raison du stress hydrique en zone témoin.
- 3 :** Pour les 3 types, une pousse de l'herbe régulière sous panneaux même en période de stress hydrique.
- 4 :** Une chute de productivité en zone agriPV moins forte qu'en zone témoin lors de la période estivale.

**Nous pouvons conclure :**

- Pour les 3 types de sol, dès que les conditions hydriques sont limitantes (début juillet), la dynamique de croissance en zone agriPV est plus élevée qu'en zone témoin.
- La zone témoin atteint même une croissance nulle à la fin de l'été puisque les précipitations sont trop faibles pour compenser la demande climatique qui vide la RU du sol et qui ne permet plus à la plante de se développer.

## PRODUCTION PRAIRIALE RECOLTABLE

Sur la base des résultats des simulations de partage lumineux et de bilan hydrique précédemment présentés, la production prairiale théorique a été estimée en zone témoin et en zone agriPV en année actuelle et en 2050.

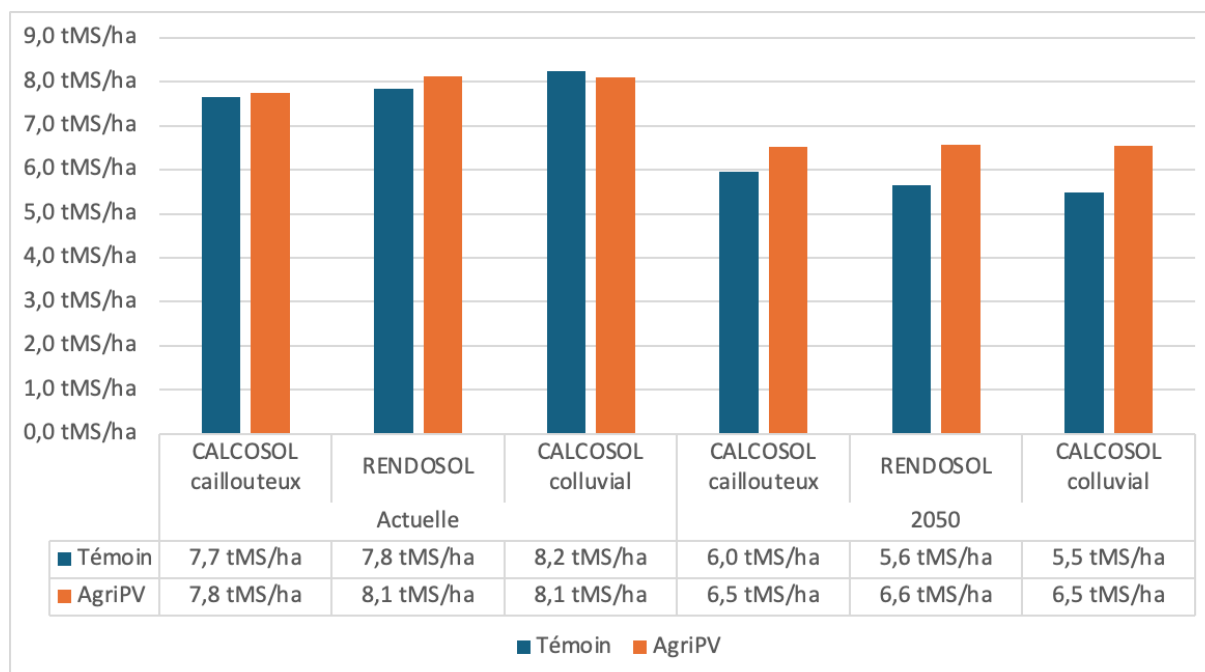


Figure 27. Potentiels de production prairiale en année actuelle et 2050. (Source : Agrisoleo)

Tableau 10. Potentiels de production prairiale en année actuelle et 2050. (Source : Agrisoleo)

| Période                  | Sol                  | Témoin     | AgriPV     | AgriPV/témoin |
|--------------------------|----------------------|------------|------------|---------------|
| Actuelle                 | CALCOSOL caillouteux | 7,7 tMS/ha | 7,8 tMS/ha | 101,3%        |
|                          | RENDOSOL             | 7,8 tMS/ha | 8,1 tMS/ha | 103,7%        |
|                          | CALCOSOL colluvial   | 8,2 tMS/ha | 8,1 tMS/ha | 98,4%         |
| 2050                     | CALCOSOL caillouteux | 6,0 tMS/ha | 6,5 tMS/ha | 109,4%        |
|                          | RENDOSOL             | 5,6 tMS/ha | 6,6 tMS/ha | 116,1%        |
|                          | CALCOSOL colluvial   | 5,5 tMS/ha | 6,5 tMS/ha | 119,1%        |
| Différence 2050/actuelle | CALCOSOL caillouteux | -22%       | -16%       |               |
|                          | RENDOSOL             | -28%       | -19%       |               |
|                          | CALCOSOL colluvial   | -33%       | -19%       |               |

En année moyenne actuelle, nous observons une légère augmentation pour le CALCOSOL caillouteux et le RENDOSOL du potentiel de production récoltable de la prairie en zone agriPV par rapport au témoin, en prenant en compte la sécheresse et le rayonnement comme facteurs limitants du rendement. Il y a une très légère baisse dans le CALCOSOL colluvial. Les rendements agriPV seront respectivement de 101%, 103% et 98% de la zone témoin.



**En moyenne pondérée à la surface, le potentiel de rendement en zone agriPV serait à 101,7% du témoin pour une année actuelle.**

En 2050, le rendement en zone agriPV sera plus fortement amélioré dans les 3 types de sol avec 109%, 116% et 119% du potentiel de rendement témoin. En effet, le risque de stress va s'intensifier et l'effet protecteur contre le stress hydrique de la structure sera plus important.

**En moyenne pondérée à la surface, le potentiel de rendement en zone agriPV serait à 111,6% du témoin pour une année future.**

En zone agriPV, la baisse de rendement entre une année actuelle et 2050 sera plus faible qu'en zone témoin. La baisse en zone témoin d'ici 2050 ira de -22% à -33% contre -16% à -19% en zone agriPV. La structure va donc sécuriser le potentiel de production dans le futur.

**Le rendement de la prairie sera préservé en zone agrivoltaïque et supérieur au seuil de 90% de la zone témoin. Le rendement interannuel sera de plus lissé, permettant une meilleure pérennité du système agricole.**

**L'effet principal de l'installation agrivoltaïque est une protection contre le stress hydrique et thermique qui sera de plus en plus fort dans un futur proche. Cette protection permet une meilleure production estivale, une meilleure résilience face à des conditions sèches. La protection contre le stress hydrique permettra de préserver la dynamique de croissance et la qualité de la prairie d'une année sur l'autre en la protégeant des événements climatiques extrêmes.**

---

## QUALITE DU FOURRAGE

Les effets de l'ombrage modéré induit par les structures sur la qualité du fourrage sont décrits ci-dessous :

### 1. Teneur en protéines<sup>5,6</sup>

- **Augmentation de la concentration en azote** : Avec un ombrage modéré, les plantes tendent à concentrer davantage d'azote dans les feuilles. L'azote est un composant essentiel des protéines, ce qui entraîne une **augmentation de la teneur en protéines**

---

<sup>5</sup> Sander et al., 1997 -Wall et al., 1997 in Benavides et al., 2009 ; Peri et al., 2007

<sup>6</sup> Gaulier, Mathilde, Didier Combes, et Thomas Di Franco. « Study of the impact of shading from photovoltaic panels on the agronomic performance of grazed grassland and alfalfa crops ». INRAe. Consulté le 28 octobre 2024.

Stepéc, Amélie, Didier Combes, Vincent Colas, et Cécile Augrain. « Influence of Fixed Solar Panels on the Pedoclimatic Conditions and Plant Development of Two Grazed Grasslands. »,

**de l'herbe.** Cette augmentation est bénéfique pour le bétail, car une teneur élevée en protéines améliore l'apport en acides aminés essentiels, favorisant la croissance et la production laitière des animaux.

- **Effet de l'ombrage sur la synthèse de protéines :** La réduction du stress lumineux et thermique permet aux plantes d'allouer une partie de leur énergie à la synthèse de protéines au lieu de concentrer leurs ressources sur la lutte contre les stress environnementaux, comme la chaleur excessive.

## 2. Amélioration de la digestibilité<sup>7</sup>

- **Augmentation du rapport feuilles/tiges :** L'ombrage modéré des panneaux entraîne une croissance de la plante avec une plus grande proportion de feuilles par rapport aux tiges. Les feuilles sont plus digestibles que les tiges, car elles contiennent moins de lignine (fibres indigestes) et sont riches en protéines.
- **Réduction des fibres indigestes :** L'herbe exposée à une forte lumière produit souvent plus de fibres pour se protéger contre l'excès de rayonnement. Sous les panneaux, la **réduction du rayonnement direct** limite la production de fibres structurales, comme la lignine, rendant l'herbe plus tendre et plus facilement assimilable par le bétail.

## 3. Concentration en sucres solubles<sup>8</sup>

- **Optimisation de la photosynthèse :** Sous un ombrage partiel, la photosynthèse peut être stabilisée, permettant à la plante de produire et de stocker des **sucres solubles** de manière optimale. Ces sucres sont une source d'énergie rapide pour les animaux et contribuent à améliorer la qualité du fourrage.
- **Réduction des excès de sucre en été :** En été, les fortes températures peuvent augmenter la teneur en sucres au détriment d'autres nutriments. L'ombrage des panneaux aide à tempérer ce phénomène, maintenant un équilibre dans la composition en sucres et évitant une maturation trop rapide.

## 4. Concentration en minéraux essentiels<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> Berthiaume, 2006

<sup>8</sup> Berthiaume, 2006

<sup>9</sup> Portner, Sabrina, Bradley Heins, Eric Buchanan, et Michael Reese. « Forage Biomass and Nutritive Value of Grasses and Legumes Grown Under Agrivoltaic Systems ». *Agrivoltaics Conference Proceedings 2* (23 mai 2024).

- **Maintien de l'humidité pour une meilleure absorption minérale** : L'humidité accrue sous les panneaux favorise la disponibilité et l'absorption des minéraux essentiels, comme le calcium, le potassium et le magnésium, importants pour la santé animale.
- **Amélioration de la teneur en minéraux** : Avec une croissance modérée mais continue sous un ombrage partiel, les plantes peuvent allouer plus de nutriments minéraux dans leurs tissus, augmentant la teneur en minéraux de l'herbe. Cela contribue à une alimentation plus équilibrée et complète pour le bétail.

## 5. Limitation du stress oxydatif et augmentation des antioxydants<sup>10</sup>

- **Effet modéré du rayonnement** : Le rayonnement solaire direct peut provoquer un stress oxydatif chez les plantes, réduisant leur teneur en antioxydants. Sous l'ombre partielle des panneaux, le stress oxydatif est limité, permettant une meilleure accumulation de **composés antioxydants** comme les vitamines C et E.
- **Impact sur la santé du bétail** : Les antioxydants aident à neutraliser les radicaux libres et contribuent à la santé du bétail, renforçant le système immunitaire et améliorant la qualité nutritionnelle globale du fourrage.

## 6. Équilibre entre nutriments et énergie

- **Contrôle de la maturation et de la qualité de l'herbe** : En diminuant les conditions de stress, l'ombrage maîtrisé permet un développement plus équilibré de l'herbe, évitant une accumulation excessive de fibres. Le fourrage récolté est donc riche en nutriments facilement assimilables, en protéines, et en énergie sous forme de sucres, ce qui optimise le bilan nutritionnel pour le bétail.

---

<sup>10</sup> Pastorale, Alliance. « Radicaux libres et antioxydants », 30 octobre 2020..

### IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE LA CHALEUR SUR LES MOUTONS

L'élevage souffre des hausses de températures et de la sécheresse. Avec des températures supérieures à 20°C, les animaux réduisent leur prise alimentaire, que leur productivité diminue et leur mortalité augmente<sup>11</sup>.

**Les zones de confort en matière de température se situent : entre -8°C et +23°C pour les brebis et entre -5°C et +30°C pour les agneaux.**

Le dérèglement climatique a notamment pour conséquences une augmentation de la température ambiante et de la fréquence des sécheresses au cours de l'année.

Ces deux phénomènes climatiques impactent d'une part le comportement des prairies – stress hydrique - (quantité et qualité de l'herbe) et d'autre part le bien-être animal par effet de stress thermique de plus en plus fréquent (production animale en quantité et qualité).

Limiter la chaleur estivale, par un apport d'ombre et/ou d'eau permettra d'éviter la destruction prématurée de la prairie et de la pérenniser, voire d'augmenter sa production en été dans les zones impactées régulièrement par le manque d'eau. Ceci permettrait par conséquence de limiter le déficit fourrager de certains élevages et d'apporter de l'herbe de qualité aux animaux.

La température corporelle des mammifères résulte d'un équilibre entre production de chaleur et pertes de chaleurs. L'animal est en stress thermique lorsque ses capacités de thermorégulation sont dépassées.

Les moutons ont la capacité de garder une bonne thermo stabilité malgré de fortes variations de chaleur. Leur sensibilité au stress thermique est due à des facteurs intrinsèques (morphologie de la race, potentiel génétique de production, état de production) mais également extrinsèques (température, humidité, densité en bâtiment, ventilation). Lorsque la température extérieure augmente, la température corporelle des ovins augmente également.

Cette chaleur extracorporelle est évacuée par la dissipation de la vapeur d'eau via le halètement et la transpiration cutanée. Lorsque la température extérieure est supérieure à 36°C, la dissipation de chaleur s'effectue majoritairement par les oreilles et les pattes. C'est pourquoi les races tropicales, aux grandes oreilles et aux longues pattes, sont mieux adaptées que les races européennes dont le corps, les pattes et les oreilles sont courts et la laine fournie.

---

<sup>11</sup> <http://www.lasciencesimplement.fr/agriculture-elevage-dans-tourmente-rechauffement-climatique/>

Quand les mécanismes physiologiques de l'animal n'arrivent plus à évacuer la chaleur excessive, l'animal est en stress thermique et ses fonctions biologiques changent : la prise alimentaire diminue, impliquant des modifications métaboliques comme une augmentation de la consommation d'eau et une perturbation des réactions enzymatiques et des sécrétions hormonales. Il peut y avoir alors une modification de l'intensité et de la durée de l'œstrus, avec des conséquences sur le taux de réussite de fécondation. Le stress thermique peut aussi avoir des conséquences sur la durée de gestation, la taille de la portée et le poids des agneaux à la naissance. Des études ont montré que la température seule ne permet pas de déterminer l'état de stress thermique de l'animal. L'indice d'humidité et de chaleur (THI ou ITH) est une façon d'appréhender le stress thermique ressenti, en tenant compte à la fois de la température ambiante et de l'humidité relative.

L'indice température-humidité a été introduit par les scientifiques américains spécialistes des animaux pour alerter les éleveurs des périodes de stress thermique possibles pour les animaux. L'ITH combine les effets de la température et de l'humidité en une valeur unique.

|                  |    | Humidité (%) |    |    |    |    |    |    |     |     |
|------------------|----|--------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
|                  |    | 20           | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90  | 100 |
| Température (°C) | 22 | 66           | 66 | 67 | 68 | 69 | 69 | 70 | 71  | 72  |
|                  | 24 | 68           | 69 | 70 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74  | 75  |
|                  | 26 | 70           | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 77 | 78  | 79  |
|                  | 28 | 72           | 73 | 74 | 76 | 77 | 78 | 80 | 81  | 82  |
|                  | 30 | 74           | 75 | 77 | 78 | 80 | 81 | 83 | 84  | 86  |
|                  | 32 | 76           | 77 | 79 | 81 | 83 | 84 | 86 | 88  | 90  |
|                  | 34 | 78           | 80 | 82 | 84 | 85 | 87 | 89 | 91  | 93  |
|                  | 36 | 80           | 82 | 84 | 86 | 88 | 90 | 93 | 95  | 97  |
|                  | 38 | 82           | 84 | 86 | 89 | 91 | 93 | 96 | 98  | 100 |
|                  | 40 | 84           | 86 | 89 | 91 | 94 | 96 | 99 | 101 | 104 |

**Figure 28. Indice température-humidité (ITH) à des niveaux de température et d'humidité particuliers. (Source : National Animal Diseases Information Services)**

La chaleur affecte la croissance des animaux adultes, notamment en diminuant la prise alimentaire. C'est également le cas pour les agneaux dont le Gain Moyen Quotidien (GMQ) diminue, sans doute à cause d'une diminution d'ingestion de matière sèche. Le stress thermique avant abattage entraîne la sécrétion d'adrénaline et donc la glycogénolyse du muscle, de sorte que le pH post-mortem est anormalement élevé, et ce dès les premières heures après l'abattage. La viande de ces carcasses est alors sombre, retient l'eau (davantage de pertes à la cuisson) et est plus susceptible d'être contaminée par des microorganismes et de présenter une odeur et un goût anormaux (Rana et al., 2014). Les moutons doivent être

transportés à une température maximale de 40°C s'ils sont tondus (25°C sinon) afin qu'ils ne dépensent pas leur énergie pour la dissiper sous forme de chaleur.

## ÉVOLUTION DU RISQUE DE STRESS THERMIQUE (INDICE TEMPERATURE-HUMIDITE OU ITH)

**Tableau 11. Nombre de jours par an sous stress thermique (ITH>68). (Source : Canari et Agrisoleo)**

| Espèces | Indicateurs                                    | Passé récent<br>2010 | Futur proche<br>2050 | Évolution  |
|---------|------------------------------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| Ovin    | Nombre de jours de stress thermique (ITH > 68) | 77                   | 98                   | + 21 jours |

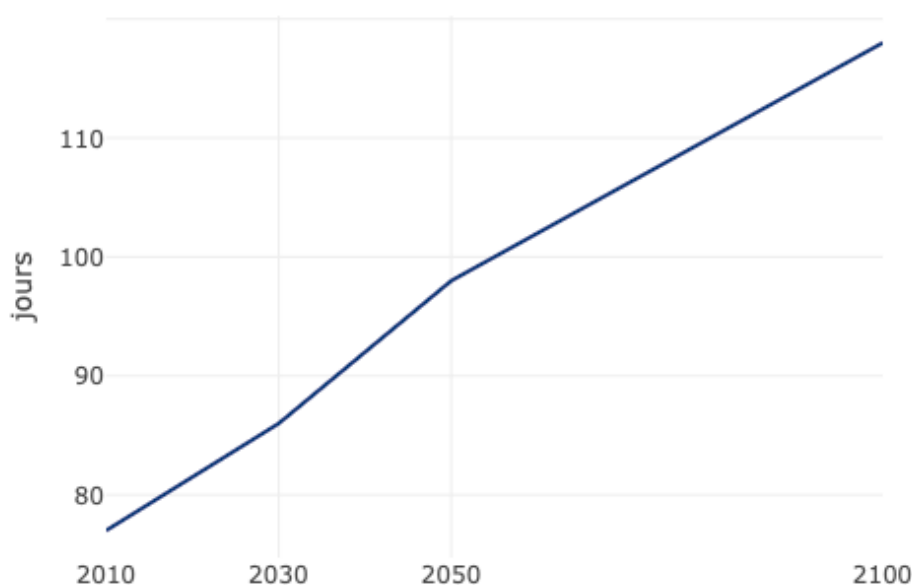


**Figure 29. Nombre de jours par an sous stress thermique (ITH>68). (Source : Canari et Agrisoleo)**

Nous observons **une hausse de 21 jours du risque de stress thermique pour les ovins**. Une augmentation de cet indicateur entraînera une réduction de l'alimentation ainsi qu'une baisse de la fertilité et de la reproduction pour un cheptel ovin.

## IMPACT DE LA CENTRALE SUR LE BIEN ETRE ANIMAL

Comme observé précédemment, la centrale va permettre une baisse significative du nombre de jours avec une température >25°C en zone agriPV. C'est respectivement 16 et 26 jours en moins pour une année actuelle et dans un futur proche en 2050, ce qui va contribuer à améliorer le bien-être animal en conditions thermiques excessives.

La baisse du nombre de jours de gel aura peu d'effet pour le troupeau car cela coïncide avec la période où les animaux sont en bergerie, de fin décembre à début mars.



## ADEQUATION AVEC LES BESOINS FOURRAGERS DU CHEPTEL

**Les reproducteurs seront nourris avec un mélange d'orge, de blé et de pois produits sur l'exploitation. L'alimentation des agneaux, quant à elle, ne sera pas produite sur la ferme et sera achetée.**

Les besoins en fourrage, pour un cheptel de 320 brebis, 80 agnelles et 13 béliers (soit l'équivalent de 58,6 UGB), sont estimés à 278,04 tonnes de matière sèche par an, avec une consommation de 13 kg de matière sèche par UGB et par jour.

Les parcs à moutons couvrent environ 84 hectares. Les îlots 11, 12, 15 et 6, d'une superficie totale de 41 hectares, ne font pas partie du projet agrivoltaïque et sont principalement adaptés au pâturage ovin en raison de leur pente. Ces terrains produisent un rendement moyen de 4 tonnes de matière sèche par hectare et par an, soit une production totale de 164 tonnes de matière sèche par an. Seulement 10 hectares sont fauchables.

Les îlots 7, 8 et 14, qui s'étendent sur 43 hectares sont inclus dans le projet agrivoltaïque. Ils seront principalement utilisés pour le pâturage. Cependant, ils pourront être fauchés en fonction de la pousse de l'herbe.

Sur une année actuelle, en moyenne pondérée à la surface, le potentiel de rendement en zone agriPV serait à 101,7% du témoin dont le rendement réel actuel est de 6 tMS/ha. La moyenne réelle de la production prairiale est donc estimée à 6,10 tMS/ha. La production totale est donc estimée à 262 tMS.

**Au total, les surfaces dédiées à l'atelier ovin produiront 421 tonnes de matière sèche par an. L'atelier est totalement autonome en fourrage, avec une production excédentaire par rapport aux besoins du troupeau. Cet excédent permettra de constituer des stocks pour faire face aux aléas climatiques, et les surplus pourront être vendus à d'autres éleveurs, comme c'est le cas actuellement.**



Figure 30. Surfaces fourragères et en céréales à destination de l'atelier ovien.

## ADAPTION DE LA CENTRALE POUR L'ACTIVITE D'ELEVAGE

Le projet est de faire pâturer 320 brebis à l'année en pâturage tournant, par conséquent, en concertation avec Escofi et l'exploitant, il est donc prévu pour que le projet soit conciliable avec un élevage ovin « productif » :

- Une hauteur des panneaux à 1,5 m au point le plus bas, afin que les moutons puissent passer aisément sous les modules (respect de la recommandation de l'Institut de l'élevage dans son guide "L'agrivoltaïsme appliqué à l'élevage de ruminants" publié en 2021),
- Une largeur pieu à pieu de 12 m et 14,5 m, afin d'avoir des bonnes conditions agronomiques et environnementales et de faciliter les opérations culturales et de fenaison, le cas échéant.

La mise en place de points d'eau (sans aucune fonction hydraulique) répartis sur le parcellaire est aussi prévu afin d'avoir des zones d'abreuvements pour les moutons quand l'exploitant sera amené à subdiviser les parcelles avec des clôtures mobiles. On peut retenir une consommation moyenne de 6 litres par jour (l/j) pour une brebis suitée. En conditions climatiques « normales », le besoin en eau total est donc estimé à 701 m<sup>3</sup> pour assurer l'abreuvement de 320 brebis allaitantes au pâturage, soit environ 2,2 m<sup>3</sup>/brebis. Le besoin pour les 80 agnelles est estimé à 117 m<sup>3</sup> en retenant 4 l/j. Les 13 béliers auraient un besoin de 27,5 m<sup>3</sup>. La consommation d'eau se fait essentiellement de jour : + de 80% du volume est bu entre 7h et 19h. L'activité nocturne est très faible : moins de 1% du volume quotidien est bu entre 2h et 4h.

Il est aussi prévu de mettre en place des clôtures permanentes et mobiles, ainsi que plusieurs zones de contention pour faciliter la manipulation et le travail sur les animaux.



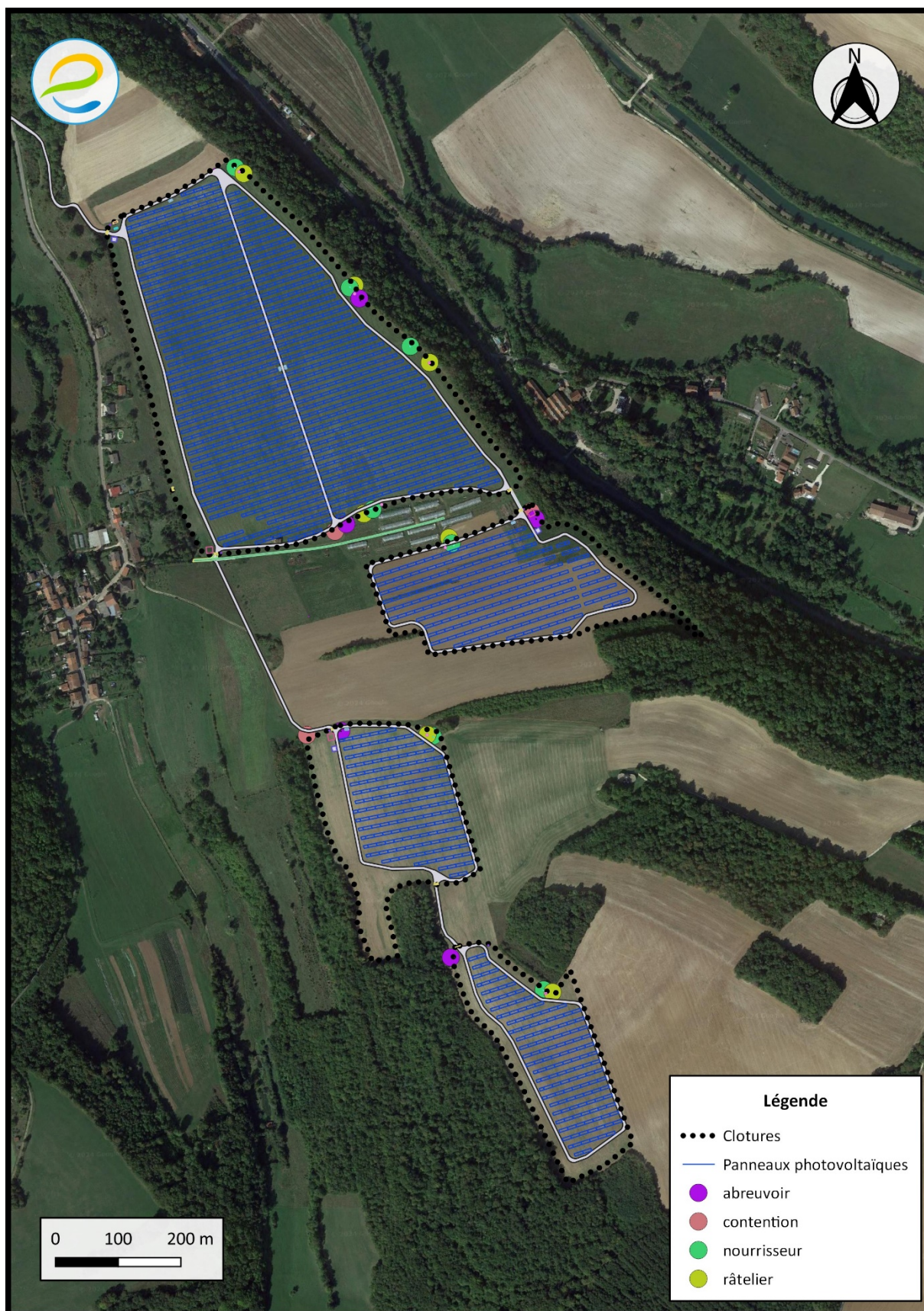


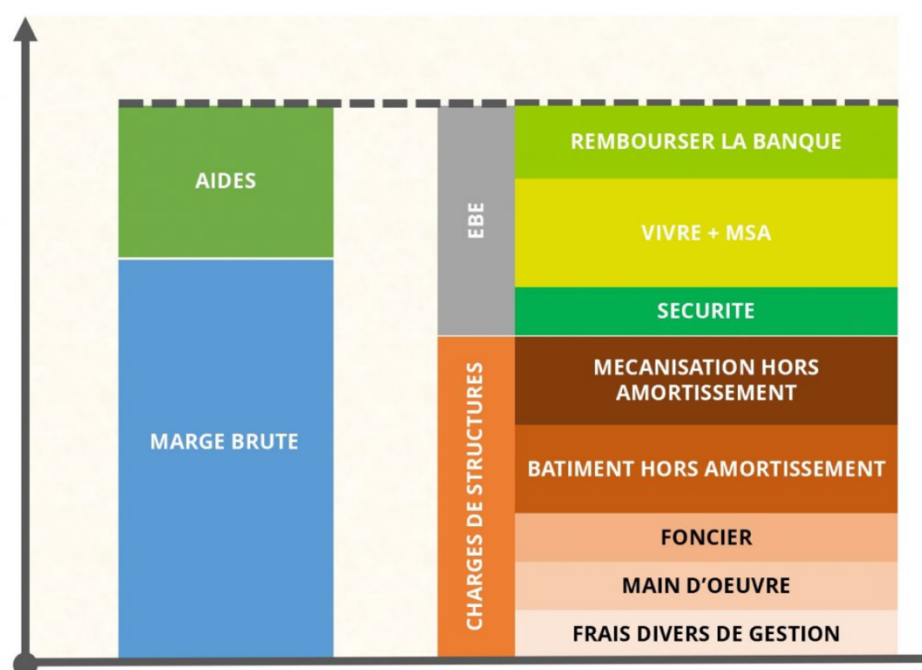
Figure 31. Aménagements pour l'atelier ovin

## ÉVALUATION DE L'IMPACT ECONOMIQUE

Cette partie analyse les impacts économiques de l'introduction de l'atelier ovin, en comparant les marges brutes des ateliers maraîchage, fourrage et grande culture avant et après la mise en place de ce nouveau projet. Elle est un extrait de l'étude technico-économique annexée à cette étude.

### EFFET SUR LA MARGE BRUTE ET L'EBE

Le calcul de la Marge Brute est avant tout un outil de progression en groupe ; les résultats mesurent l'impact des choix techniques sur les résultats économiques en mettant de côté les charges de structure et les aides. Néanmoins, pour bien appréhender la rentabilité d'une exploitation ou d'un atelier, il convient de calculer l'Excédent Brute d'Exploitation (EBE). L'EBE est obtenu en prenant la marge brute de l'exploitation et en déduisant les charges de structure décaissables. L'EBE sert à rembourser les annuités d'emprunt et les frais financiers, à réaliser les prélèvements privés nécessaires aux besoins du ménage (dont l'impôt sur le revenu), à autofinancer des investissements et à améliorer le fonds de roulement et la trésorerie de l'exploitation.



### ATELIER MARAICHAGE

Le projet agrivoltaïque n'entraîne aucune modification du système maraîcher, et la marge brute dégagée par l'atelier maraîchage demeure donc inchangée, ce qui confirme la stabilité de cet atelier dans le cadre du projet global. Cette continuité garantit que le maraîchage reste une composante économique viable et pérenne de l'exploitation.



En moyenne, la marge brute dégagée par l'atelier maraîchage sur les années 2021,2022 et 2023 s'élève à 39 154 euros.

---

## ATELIER FOURRAGER

Le projet agrivoltaïque et la création de l'atelier ovin impactent directement la surface fourragère revendue. Une partie de la surface, soit 42.23 ha, est convertie en prairie permanente (PP) pour le pâturage des ovins, et 2.88 ha ne sont plus cultivables. De plus, 15 ha de luzerne passent à une culture en autoconsommation pour le troupeau.

La surface fourragère revendue passe ainsi de 136.56 ha initialement à 79.33 ha, soit une réduction à environ 58.1 % de la surface initiale.

**Cette réduction se traduit par une diminution de la marge brute de l'atelier fourrage, qui atteint 4 080 euros par an.**

À cela s'ajoute la perte des aides légumineuses sur les 57.23 ha concernés, correspondant à une perte de 130 euros par hectare.

---

## ATELIER GRANDES CULTURES

L'atelier grande culture n'est pas affecté par les changements structurels liés au projet agrivoltaïque et à l'introduction du cheptel ovin. Sa marge brute demeure stable et continue de contribuer aux résultats globaux de l'exploitation sans variation significative.

**Après la mise en place du projet agrivoltaïque et l'introduction de l'atelier ovin, la situation de l'atelier grande culture reste stable. Le produit brut est estimé à 15 923 euros, les coûts des semences sont de 2 526 euros, et la marge brute atteint 13 397 euros.**

---

## ATELIER OVIN

Le tableau suivant présente la marge brute dégagée par l'atelier ovin. Le produit brut total généré par l'atelier ovin s'élève à **61 530 euros**.

**Tableau 12. Marge brute de l'atelier ovin**

|                                          | Atelier ovin |
|------------------------------------------|--------------|
| <b>Produit brut</b>                      | 61530        |
| <b>Aliments (a)</b>                      | 21600        |
| <b>Vétérinaire (b)</b>                   | 4000         |
| <b>Travaux / tiers (c)</b>               | 1000         |
| <b>Fournitures diverses (d)</b>          | 2000         |
| <b>Charges opérationnelles (a+b+c+d)</b> | 28600        |
| <b>Marge brute</b>                       | <b>32930</b> |



Les charges opérationnelles totales s'élèvent à **28 600 euros**.

**Après déduction des charges opérationnelles, la marge brute de l'atelier ovin est de 32 930 euros. Cette marge montre que, malgré les coûts importants liés à l'alimentation et aux soins du cheptel, l'atelier ovin est économiquement viable.**

De plus, l'atelier ovin bénéficie d'aides PAC annuelles estimées à **14 680 euros**, dont **7 480 euros d'ICHN** (Indemnités Compensatoires de Handicaps Naturels) et **7200 euros de primes ovines** qui seront prises en compte lors du calcul de l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE).

**L'impact de la création de l'élevage ovin sur l'exploitation est donc favorable, et les aides supplémentaires, prises en compte dans le calcul de l'EBE, viendront renforcer encore cette rentabilité.**

## BILAN AVANT ET APRES PROJET AGRIVOLTAÏQUE

L'analyse des résultats économiques de l'exploitation avant et après la mise en place du projet agrivoltaïque et de l'atelier ovin met en évidence une évolution positive de l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE).

**Tableau 13. Bilan économique avant et après projet (en euros)**

|                                      | Moyenne avant-projet | Après projet |
|--------------------------------------|----------------------|--------------|
| <b>Produits bruts</b>                | 77060                | 135648       |
| <b>Autres produits</b>               | 25165                | 25165        |
| <b>Aides</b>                         | 81019                | 88159        |
| <b>Charges opérationnelles</b>       | 18867                | 46889        |
| <b>Autres charges</b>                | 33871                | 33871        |
| <b>Frais de structures</b>           | 89875                | 89875        |
| <b>Frais de structures « ovins »</b> |                      | 36500        |
| <b>EBE</b>                           | <b>40632</b>         | <b>41837</b> |

L'analyse montre que l'EBE passe d'une moyenne de 40 632 euros entre 2021 et 2023 à 41 837 euros en année N, après la mise en place du projet agrivoltaïque et l'introduction de l'atelier ovin.

**Cette augmentation de l'EBE confirme la viabilité économique du projet et le maintien durable des revenus agricoles, tout en démontrant que l'exploitation a la capacité de s'adapter à de nouvelles activités, comme l'élevage ovin, tout en conservant sa rentabilité.**

De plus, l'étude montre qu'il est possible d'embaucher un salarié à plein temps, renforçant ainsi la capacité opérationnelle de l'exploitation.

## SUIVI TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA SYNERGIE

Dans le cadre du décret de la loi d'accélération des énergies renouvelables, un suivi agronomique sera obligatoire pour les projets agrivoltaïques afin de démontrer le maintien de la production agricole tout au long de l'exploitation de la centrale.

### LE PROTOCOLE DE SUIVI

Un protocole de suivi sera élaboré afin de définir :

- Les indicateurs à suivre,
- La méthode de suivi des indicateurs,
- Les mesures nécessaires,
- Les données économiques nécessaires à l'évaluation du maintien de la production.

Ce protocole pourra être réalisé par l'organisme qui réalisera les mesures sur le terrain au début du suivi.

Dans le cas d'un projet agrivoltaïque avec pâturage ovin, les indicateurs de suivis pourront être :

#### Données techniques :

- Fourrage :
  - Rendement fourrager annuel (tMS/ha)
  - Diversité des espèces prairiales
  - Valeur alimentaire de l'herbe

La comparaison sera faite entre les résultats sous panneaux, entre les panneaux et sur les zones témoins sans panneaux et aux résultats techniques locaux (département ou petite région agricole selon le plus pertinent et la disponibilité des données).

- Animal :
  - Chargement
  - Bien-être animal :
    - Température de l'air (sous et entre les panneaux)
    - Stress thermique (observations en période de fortes chaleurs, utilisation d'outils connectés, suivi du pH ruminal)
  - Productivité du cheptel : taux de productivité, prolificité, taux de mortalité, poids des agneaux / veaux (résultats comptables de l'éleveur)

- Qualité du sol :
    - Analyses physico-chimiques (1ère année et au bout de 5 ans)
- La comparaison sera faite avec l'analyse agropédologique de l'état initial.

## Données économiques :

- Revenu issu de la vente des productions végétales et animales : Excédent Brut d'Exploitation  
La comparaison sera faite avec les résultats économiques de l'exploitation avant-projet et avec les résultats économiques locaux si donnée disponible

A date, l'organisme en charge de l'élaboration du protocole et du suivi de la centrale agrivoltaïque reste à identifier. ESCOFI envisage deux partenaires :

- La Chambre d'Agriculture de la Meuse, si cette dernière propose une telle prestation,
- Le Pôle National de Recherche sur l'Agrivoltaïsme (PNR-agriPV) piloté par l'INRAE.

Étant partenaire, ESCOFI est favorable à l'intégration du projet des Bussièrès dans ce pôle dans une démarche de **science collaborative**. Le PNR envisage, pour cela, de créer une unité qui réalisera les suivis des centrales.

## LES ZONES TEMOINS

Bien que non obligatoire dans le cadre d'un projet agrivoltaïque sur élevage, le projet agrivoltaïque des Bussièrès prévoit la mise en place de zones témoins afin d'évaluer de manière précise l'impact de l'installation sur la zone.

Dans un souci de cohérence avec le protocole de suivi qui sera établi, la délimitation des zones témoins sera définie ultérieurement.

Toutefois, la zone d'implantation présente des espaces dégagés de la présence de panneaux aux mêmes caractéristiques que les parcelles équipées de panneaux solaires :

- Une pédologie équivalente
- Un ensoleillement identique
- Une conduite d'élevage similaire
- Un couvert végétal semblable.

Au total, 12.20 ha pourraient être utilisés comme zone témoin :

- Environ 2 ha 50 sont représentatifs du Calcosol caillouteux
- Environ 1 ha 10 ha sont représentatifs du Calcosol colluvionne en surface
- Environ 7 ha sont représentatifs Calcosol colluvial
- Environ 1.6 ha ha sont représentatifs du Rendosol

La surface retenue pourra donc représenter 5% de la surface sous panneaux.

Les zones témoins seront clôturées, aménagées avec des points d'abreuvement et d'affouragement. Le chargement en animaux et les pratiques d'élevage seront bien identiques aux surfaces sous panneaux.





Figure 32. Typologie de sol au droit du projet des Bussières et zones témoin potentielles

## ADEQUATION AVEC LE CADRE REGLEMENTAIRE

| Règlement                                                                      | Critère                                                                       | Justification                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Conformité                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Les critères de qualification de l'installation agrivoltaïque dans la loi APER | <b>Le projet est réversible</b>                                               | Fondations en vis ou pieux battus totalement réversibles.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|                                                                                | <b>Amélioration du potentiel agronomique</b>                                  | En année actuelle, les rendements agriPV seront respectivement de 101%, 103% et 98% de la zone témoin. En moyenne pondérée à la surface, le potentiel de rendement en zone agriPV serait à 101,7% du témoin pour une année actuelle.<br>En 2050, le rendement en zone agriPV sera plus fortement amélioré dans les 3 types de sol avec 109%, 116% et 119% du potentiel de rendement témoin, soit une moyenne pondérée de 111,6%.                                                                                                        |    |
|                                                                                | <b>Adaptation au changement climatique</b>                                    | La structure permet la baisse du nombre de jours de gel en zone agriPV, - 13 j en année actuelle, ce qui aura un effet favorable pour le redémarrage de la prairie. Elle permet de réduire aussi le risque de stress thermique avec la baisse du nombre de jours avec une température >25°C, - 16 j, notamment lors des phases de repousses.<br>Sur la durée du cycle de la prairie, la diminution du nombre de jours de stress hydrique en zone agriPV varie de -36 % dans le CALCOSOL colluvial à -46 % dans le CALCOSOL caillouteux. |    |
|                                                                                | <b>Amélioration du bien-être animal</b>                                       | La centrale va permettre une baisse significative du nombre de jours avec une température >25°C en zone agriPV. C'est respectivement 16 et 26 jours en moins pour une année actuelle et dans un futur proche en 2050, ce qui va contribuer à améliorer le bien-être animal en conditions thermiques excessives.<br>Le projet offre également une protection contre la prédation.                                                                                                                                                        |  |
|                                                                                | <b>La parcelle est agricole</b>                                               | Les panneaux sont implantés sur une surface agricole continue présentant les mêmes caractéristiques.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|                                                                                | <b>La parcelle est exploitée par un agriculteur actif</b>                     | L'exploitant est le seul associé à l'EARL et est affilié à la MSA. (cf. attestation)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|                                                                                | <b>Maintien d'une production agricole significative (rendement &gt; 90 %)</b> | En année actuelle, les rendements agriPV seront respectivement de 101%, 103% et 98% de la zone témoin. En moyenne pondérée à la surface, le potentiel de rendement en zone agriPV serait à 101,7% du témoin pour une année actuelle.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|                                                                                | <b>Maintien d'un revenu durable</b>                                           | L'analyse montre que l'EBE passe d'une moyenne de 40 632 euros entre 2021 et 2023 à 41 837 euros en année N, après la mise en place du projet agrivoltaïque et l'introduction de l'atelier ovin.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |



|                                                        |                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |                                                                                                   | Cette augmentation de l'EBE confirme la viabilité économique du projet et le maintien durable des revenus agricoles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                       |
| Les précisions apportées par le décret du 9 avril 2024 | Présence d'une zone témoin (hors structure éprouvée, projet similaire ou impossibilité technique) | <p>Le projet agrivoltaïque des Bussières prévoit la mise en place de zones témoins afin d'évaluer de manière précise l'impact de l'installation sur la zone.</p> <p>Au total, 12.20 ha pourraient être utilisés comme zone témoin :</p> <p>La surface retenue pourra donc représenter 5% de la surface sous panneaux.</p> <p>Les zones témoins seront clôturées, aménagées avec des points d'abreuvement et d'affouragement. Le chargement en animaux et les pratiques d'élevage seront bien identiques aux surfaces sous panneaux.</p> |                                                                                       |
|                                                        | Le taux de couverture ne dépasse pas 40%                                                          | <p>Le Taux d'Occupation du Sol (TOS) ou taux de couverture du projet agrivoltaïque de Nantois a été calculé suivant deux méthodes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Largeur table/ interpieu : 30% et 36%</li> <li>- Surface projetée (la surface projetée au sol des tables est de 9.7 ha) / surface clôturée agricole équipée : 28.6%</li> </ul>                                                                                                                                                                         |    |
|                                                        | L'activité principale reste agricole                                                              | <p>La surface totale non-cultivable est de 28 797m<sup>2</sup>, dont 28 346m<sup>2</sup> de pistes.</p> <p>La surface non cultivable est donc de 7%.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |   |
|                                                        | Mise en place d'un système de suivi et de contrôle avant et pendant l'exploitation de la centrale | Protocole de suivi en cours de réflexion.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |

## BIBLIOGRAPHIE

*(liste non exhaustive)*

« 20240224\_ExpertiseAgroPedologique\_SensibilitéTassements\_Agrivoltaïsme\_Nantois\_2024\_Escofi.pdf », s. d.

« 20240306\_Etude CA55 projet agricole\_v3.pdf », s. d.

Arrêté du 5 juillet 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur terrains agricoles, naturels ou forestiers.

Décret n°2024-318 du 8 avril 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers.

Duru, M., E. Justes, A. Langlet, V. Tirilly, S. Rouziès, L. Sos, et R. Viard. « Comparaison des dynamiques d'apparition et de mortalité des organes de fétuque élevée, dactyle et luzerne (feuilles, talles et tiges) ». *Agronomie* 13, n° 4 (1993): 237-52. <https://doi.org/10.1051/agro:19930401>.

Gaulier, Mathilde, Didier Combes, et Thomas Di Franco. « Study of the impact of shading from photovoltaic panels on the agronomic performance of grazed grassland and alfalfa crops ». INRAe. Consulté le 28 octobre 2024. <https://cdn.fourwaves.com/static/media/formdata/80620b4f-7d71-4fa3-913f-38e2edbf246b/07d166dc-13e1-484c-b7e6-dd4d9f97a0ae.pdf>.

Jeangros, B, et E Mosimann. « Fonctionnement de La Prairie Pâturée: Structure Du Couvert et Biodiversité », s. d.

Jouany, C, P Cruz, M Duru, et C Stroia. « Variabilité de la réponse aux stress hydrique et thermique d'une prairie naturelle », 2009.

Lemaire, Gilles. « Sécheresse et production fourragère », 2008.

Loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelable.

Mariotte, Pierre. « Utiliser la somme des températures pour évaluer le rendement et la qualité fourragère des prairies permanentes et temporaires intensives », s. d.

Pastorale, Alliance. « Radicaux libres et antioxydants », 30 octobre 2020. <https://www.alliance-elevage.com/informations/article/radicaux-libres-et-antioxydants>.

Picon-Cochard, C, J Bloor, M Zwicke, et M Duru. « Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes », 2013.

Stepec, Amélie, Didier Combes, Vincent Colas, et Cécile Augrain. « Influence of Fixed Solar Panels on the Pedoclimatic Conditions and Plant Development of Two Grazed Grasslands. », s. d.

Sturchio, Matthew A., Steven A. Kannenberg, et Alan K. Knapp. « Agrivoltaic arrays can maintain semi-arid grassland productivity and extend the seasonality of forage quality ». *Applied Energy* 356 (15 février 2024): 122418. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122418>.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 : CADRE REGLEMENTAIRE

#### LA LOI APER

Le **Parlement a définitivement adopté le mardi 7 février 2023 le projet de loi sur l'accélération des énergies renouvelables**. Porté par Agnès Pannier-Runacher, l'article 54 de ce texte crée notamment un régime juridique de l'installation agrivoltaïque dans le Code de l'Énergie. Le vote a été acquis par 300 voix « pour » et 13 voix « contre ». Le texte répond à l'objectif fixé par Emmanuel Macron pour 2050 de **multiplier par dix la capacité de production d'énergie solaire pour dépasser les 100 GW**.

L'article L. 314-36 de la loi d'accélération de la production d'énergies renouvelables précise qu'une installation agrivoltaïque est 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.

**Cette définition est complétée par un ensemble de critères caractérisant le statut agrivoltaïque de l'installation, qui doit notamment :**

- Être réversible ;
- Être précédée d'une installation photovoltaïque en toiture des bâtiments d'exploitation existants, lorsque cela est possible techniquement ;
- Permettre à la production agricole d'être l'activité principale de la parcelle agricole ;
- Garantir une production agricole significative et un revenu durable en étant issu ;
- Fournir directement à l'échelle de la parcelle agricole au moins un des services parmi : amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques, adaptation au changement climatique, protection contre les aléas, amélioration du bien-être animal (détails en Annexe 1).

Les trois premiers critères relèvent globalement de la conception technique du projet et du choix des équipements, pour viser une compatibilité avec les bâtiments, les équipements et l'itinéraire technique agricole en place ou planifié. Cette expertise est présente classiquement chez les développeurs de projets ou les bureaux d'études spécialisés en énergie photovoltaïque. Les deux derniers critères appellent une compréhension fine des conditions d'exploitation, sur les plans agro-pédo-climatiques et zootechniques. Afin de fournir les services précités, la conception et le pilotage de projets doivent idéalement être fondés sur une analyse quantitative des effets induits par les modules photovoltaïques sur la parcelle.

#### DECRET RELATIF AU DEVELOPPEMENT DE L'AGRIVOLTAÏSME ET AUX CONDITIONS D'IMPLANTATION

Le décret n° 2024-318 du 8 avril 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels

ou forestiers a été publié au Journal officiel du 9 avril 2024. Il contient une définition de l'agrivoltaïsme et replace l'exploitation agricole au centre du débat. Son article R. 314-114 indique ainsi que « le service d'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques mentionné au II de l'article L. 314-36 consiste, d'une part, en une amélioration des qualités agronomiques du sol et, d'autre part, en une augmentation du rendement de la production agricole ou, à défaut, au maintien de ce rendement ou au moins à la réduction de la baisse tendancielle du rendement qui est observée au niveau local ». Peut également être considérée comme améliorant le potentiel agronomique des sols toute installation qui permet une remise en activité agricole ou pastorale d'un terrain agricole inexploité depuis plus de cinq années.

### PERTE DE RENDEMENT INFÉRIEURE A 10 %

---

Comme prévu, pour l'ensemble des installations agrivoltaïques hors élevage, la production agricole est considérée comme significative, au sens du II de l'article L. 314-36, si la moyenne du rendement par hectare observé sur la parcelle mentionnée à l'article R. 314-108 est supérieure à 90 % de la moyenne du rendement par hectare observé sur une zone témoin ou un référentiel en faisant office.

Cette zone témoin devra répondre aux conditions suivantes :

- Représenter une superficie d'au moins 5 % de la surface agrivoltaïque installée, dans une limite d'un hectare ;
- Être située à proximité de l'installation agrivoltaïque

Toutefois, il peut être dérogé à l'obligation de se référer à la zone témoin mentionnée à l'article R. 311-114 dans les conditions décrites en Annexe 2.

Pour garantir que la production agricole est l'activité principale, conformément au 1° du IV de l'article L. 314-36, une installation agrivoltaïque doit satisfaire les deux conditions suivantes :

- La superficie qui n'est plus exploitable du fait de l'installation agrivoltaïque n'excède pas 10 % de la superficie totale couverte par l'installation agrivoltaïque ;
- La hauteur de l'installation agrivoltaïque ainsi que l'espacement inter-rangées permettent une exploitation normale et assurent notamment la circulation, la sécurité physique et l'abri des animaux ainsi que, si les parcelles sont mécanisables, le passage des engins agricoles.
- Pour les installations de plus de 10 MWc n'étant pas régies par l'arrêté mentionné au 3° de l'article R. 311-115, le taux de couverture défini à l'article R. 314-119 n'excède pas 40 %.

---

### ARRÊTÉ RELATIF AU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRIVOLTAÏSME ET AUX CONDITIONS D'IMPLANTATION

L'arrêté du 5 juillet 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers a été publié au Journal officiel du 7 juillet 2024. Il contient des précisions sur les

contrôles associés à la structure agrivoltaïque. Il apporte notamment des précisions sur les indicateurs de production agricole pertinents, dans le cas des différentes productions agricoles.

## DEFINITION DES INDICATEURS PERTINENTS POUR EVALUER LA PRODUCTION AGRICOLE

---

Dans l'Article 3 de l'arrêté :

- Pour l'application de l'article R. 314-114 du code de l'énergie, durant les cinq premières années suivant l'achèvement des travaux au sens de l'article L. 462-1 du code de l'urbanisme de l'installation agrivoltaïque, **la moyenne du rendement par hectare** observé sur la parcelle mentionnée à l'article R. 314-108 est calculée comme la moyenne du rendement par hectare depuis la déclaration attestant l'achèvement et la conformité des travaux. Passé ce délai, elle est calculée comme la moyenne du rendement par hectare sur les cinq dernières années, en excluant la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible ;
- **Pour les installations agrivoltaïques sur élevage**, durant les cinq premières années suivant l'achèvement des travaux au sens de l'article L. 462-1 du code de l'urbanisme de l'installation agrivoltaïque, la moyenne de l'indicateur pertinent retenu est calculée comme la moyenne de cet indicateur depuis l'achèvement de l'installation. Passé ce délai, elle est calculée comme la moyenne de l'indicateur pertinent retenu sur les cinq dernières années, en excluant la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible. Dans ce cas, la production agricole est considérée comme significative lorsque la moyenne de l'indicateur pertinent retenu sur la parcelle agrivoltaïque est supérieure à 90 % de la moyenne de l'indicateur pertinent retenu sur le référentiel en faisant office ;
- **Dans le cas d'une installation sur élevage ruminant**, les indicateurs pertinents retenus sont la production de biomasse fourragère et le taux de chargement. Le critère mentionné au 2° doit être vérifié cumulativement sur ces deux indicateurs, de la manière suivante :
  - La production de biomasse fourragère est mesurée à l'échelle de la parcelle au sens de l'article R. 314-108 du code de l'énergie ;
  - Le taux de chargement est mesuré à l'échelle de la surface extérieure accessible aux animaux de l'exploitation agricole ;
- **Dans le cas d'installations sur élevage monogastrique**, l'indicateur pertinent retenu est le taux de chargement par hectare mesuré à l'échelle de la surface extérieure accessible aux animaux de l'exploitation agricole ;
- **Pour des surfaces fourragères non pâturées mais fauchées**, les dispositions des installations agrivoltaïques en production végétale s'appliquent.



L'Article 3 de l'arrêté définit également l'évaluation du revenu agricole. Il est détaillé Annexe 3.

**La publication de ce décret fixe de premiers critères, mais le cadre juridique de l'agrivoltaïsme n'est cependant pas complet et de nombreuses dispositions législatives et réglementaires sont encore attendues, à commencer par la publication de la liste des "technologies agrivoltaïques dites éprouvées" au regard des retours d'expérience fournis par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).**

L'arrêté du 5 juillet 2024 permet de préciser le critère d'évaluation du rendement agricole. A priori, dans le cas d'installations sur l'élevage, la présence d'une zone témoin n'est pas exigée car l'activité est différenciée des installations agrivoltaïques en grande culture.

## **ANNEXE 2 : DEFINITIONS DES SERVICES RENDUS A LA PARCELLE PAR LA STRUCTURE AGRIVOLTAÏQUE (LOI APER)**

- 1. L'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques. Ce point consiste à prouver l'amélioration des qualités agronomiques du sol et une augmentation du rendement de la production agricole. À défaut d'une augmentation, le maintien, voire la réduction d'une baisse tendancielle observée au niveau local sera suffisant. Le critère de l'amélioration du potentiel agronomique des sols s'appliquera aussi pour une remise en activité d'une parcelle agricole inexploitée depuis un certain nombre d'années, qui reste encore à définir.*
- 2. L'adaptation au changement climatique. Ce critère consiste en une limitation des effets néfastes du changement climatique débouchant sur une augmentation de la production agricole (ou le maintien, voire la réduction d'une baisse tendancielle observée au niveau local) ou une amélioration de la qualité de la production agricole. L'adaptation au changement climatique pourra s'observer via l'un des effets suivants : l'impact thermique grâce à la fonction de régulation thermique de la structure en cas de canicule ou de gel précoce ou tardif, l'impact hydrique avec la limitation du stress hydrique des cultures ou des prairies, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par irrigation ou la diminution de l'évapotranspiration des sols et l'amélioration du confort hydrique, ou l'impact radiatif avec la limitation des excès de rayonnement direct, notamment par la protection contre les brûlures foliaires.*
- 3. La protection contre les aléas, qui s'apprécie si les modules agrivoltaïques apportent une protection contre au moins une forme d'aléa météorologique ponctuel, faisant peser un risque sur la qualité ou la quantité de la production agricole.*
- 4. L'amélioration du bien-être animal, par l'amélioration du confort thermique des animaux ou l'accroissement de la production de biomasse pour le pâturage ou le décalage de la pousse de l'herbe.*

### **ANNEXE 3 : CONDITIONS DE DEROGATION A L'OBLIGATION DE SE REFERER A UNE ZONE TEMOIN SELON LE DECRET N°2024-318 DU 8 AVRIL 2024**

Il peut être dérogé à l'obligation de se référer à la zone témoin mentionnée à l'article R. 311-114 dans les conditions suivantes :

- Pour les installations dont le taux de couverture, tel que défini à l'article R. 314-119, est inférieur à 40 % et dans le cas où l'exploitant justifie être dans l'incapacité technique de créer une zone témoin, le préfet de département peut autoriser l'usage, dans le calcul prévu à l'article R. 311-114, d'un référentiel local fondé sur les résultats agronomiques et les séries de données historiques disponibles. Cette dérogation peut être octroyée pour toute la durée de vie de l'exploitation après avis de la commission départementale de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers ;
- Pour les installations dont le taux de couverture tel que défini à l'article R. 314-119, est inférieur à 40 % et dans le cas où l'exploitant justifie de l'existence d'une installation agrivoltaïque similaire au niveau départemental et comportant une zone témoin ou de l'existence d'une installation agrivoltaïque similaire au niveau régional, comportant une zone témoin et connaissant des conditions pédoclimatiques équivalentes ;
- L'installation utilise l'une des technologies agrivoltaïques éprouvées figurant sur une liste établie par arrêté des ministres chargés de l'énergie et l'agriculture en fonction du mode de culture ou d'élevage, du procédé technique photovoltaïque utilisé et de l'implantation géographique. L'inscription d'une technologie sur cet arrêté se fonde notamment sur l'analyse de l'état de l'art et des statistiques fournis par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie au titre du 8° du II de l'article L. 131-3 du code de l'environnement. Les données recueillies par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie font alors office de référentiel pour l'appréciation du caractère significatif de la production agricole selon la méthode définie par les dispositions du I de l'article R. 311-114 et, pour les installations agrivoltaïques sur élevage, par le second alinéa de l'article R. 314-116.

### **ANNEXE 3 : EVALUTATION DU REVENU AGRICOLE DEFINI DANS L'ARRETE DU 5 JUILLET 2024**

Dans l'Article 3 de l'arrêté :

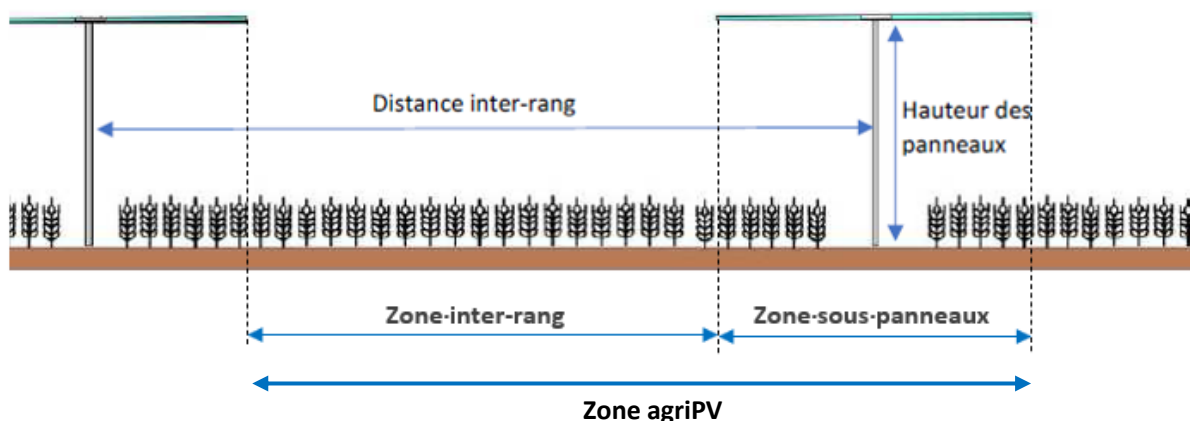
Pour l'application de l'article R. 314-117, les revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole sont calculés sur la base d'un excédent brut d'exploitation, diminué des revenus directs et indirects issus de l'installation agrivoltaïque et augmenté, le cas échéant, des rémunérations du travail et des cotisations associées. Durant les cinq premières années de vie de l'installation agrivoltaïque, la moyenne de ces revenus est calculée comme la moyenne des revenus depuis la déclaration attestant l'achèvement et la conformité des travaux. Passé ce délai, elle est calculée comme la moyenne des revenus sur les cinq dernières années, en excluant la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible. Ces revenus peuvent, le cas échéant, être indexés par des indices spécifiques et adaptés à

l'économie de la production agricole présente sur la parcelle définie à l'article R. 314-108. L'introduction de ces indices fait l'objet d'une demande auprès du représentant de l'Etat dans le département.

## ANNEXE 4 : MODELISATION AGRISOLEO

### DEFINITIONS DES ZONES D'ETUDE

L'illustration ci-dessous montre la définition des zones et paramètres pour les simulations.



Définition des zones : en aplomb des panneaux pour une position horizontale.

La zone nommée « AgriPV », dans la suite du document désigne toute la zone sous les rangs de panneaux et les inter-rangs, mais sans effet bordure. Elle n'inclut pas l'espace entre la clôture et la bordure des rangées de panneaux.

La zone « témoin » est une zone isolée sans panneaux, afin de comparer les résultats.

Définition hétérogénéité : L'hétérogénéité H est un indicateur d'irradiance qui représente l'hétérogénéité du rayonnement sur le champ. Une mauvaise hétérogénéité peut induire une composition de la prairie et une production de biomasse hétérogène.

$$H = \frac{\overline{PAR}(\text{zone sous panneaux}) - \overline{PAR}(\text{zone inter-rang})}{\overline{PAR}(\text{agriPV}) \times 2} \%$$

Avec  $\overline{PAR}$  : Rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation) pour les longueurs d'onde de 400 à 700 nm.

**Si l'hétérogénéité = 0, alors le rayonnement reçu est parfaitement homogène.**

**C'est un indicateur qui permet de refléter l'hétérogénéité du rayonnement induit par la solution choisie.**

---

## REEMPLISSAGE DE LA RESERVE UTILE EN ANNEE ACTUELLE

Nous simulons le remplissage de la réserve utile (ou stock d'eau) en zone témoin, en zone sous panneaux, en zone inter-rang et en zone agriPV pour une année typique actuelle.

$$\text{Stock eau à l'instant } t = RU(t) = RU(t-1) + \text{précipitations } (t) - ETR(t)$$

**Avec :**

$$ETR = ETP \times kc$$

*kc* : coefficient cultural

Sur ces simulations nous observons qu'à chaque fois que la réserve se vide, les zones inter-rang sous panneaux et agriPV se vident moins rapidement qu'en zone témoin.

---

## ESTIMATION DE LA RESERVE UTILE (RU) DE LA ZONE DU PROJET

---

### METHODE AVEC DONNEES DE SOL

La profondeur d'un sol correspond à l'épaisseur potentiellement colonisable par les racines. Sa connaissance intervient directement dans le calcul de la réserve utile (RU).

Cette réserve utile est fonction des derniers éléments cités, à savoir la profondeur, la texture et la teneur en éléments grossiers. Elle représente la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et restituer aux racines pour les plantes.

Cette réserve utile est estimée pour chaque unité pédologique identifiée. D'après les données du GISSOL, la réserve utile est calculée de la manière suivante :

$$RU = \sum_{i=1}^n (RUt_i \times H_i \times (1 - \%EG_i/100))$$

RU : réserve utile (mm d'eau /cm de sol) ;

Avec pour chaque horizon i allant de 1 à n (sur la profondeur de sol prospectée par les racines) :

- RU<sub>t</sub><sub>i</sub> : réserve utile texturale (mm d'eau /cm de sol) ;
- H<sub>i</sub> : épaisseur (cm) ;
- EG<sub>i</sub> : éléments grossiers présents (exprimé en pourcentage du volume total de l'horizon occupé par les éléments grossiers) ;

Toutefois, il est aussi important de souligner qu'un sol possédant une faible réserve utile peut posséder une aptitude agronomique importante si l'irrigation est pratiquée ou si la culture est adaptée (exemple : vigne).

---

### METHODE SANS DONNEES DE SOL

En l'absence de données précises sur la RU et la RFU de la zone d'étude, la RU a été calculée avec les données de réserve utile et de profondeur des sols<sup>12</sup> en France (GiS Sol). On considère par défaut que le sol est composé de 3 horizons.

- H1 : l'horizon 0 cm – 60 cm
- H2 : l'horizon 60 cm - 90 cm
- H3 : l'horizon > 90 cm.

Le nombre d'horizons est adapté à la profondeur du sol. Par exemple, un sol de 75 cm présentera un horizon H1 de 60 cm et un horizon H2 de 15 cm.

D'après ARVALIS<sup>13</sup>, les valeurs de RFU communément utilisées selon la profondeur du sol sont :

- RFU = 2/3\*RU sur l'horizon 0 cm – 60 cm (H1) ;
- RFU = 1/2\*RU sur l'horizon 60 cm – 90 cm (H2) ;
- RFU = 1/3\*RU sur l'horizon > 90 cm (H3).

La RFU est calculée telle que :

$$RFU (mm) = \left( RU \left( \frac{mm}{cm} \right) * H1 * \frac{2}{3} \right) + \left( RU \left( \frac{mm}{cm} \right) * H2 * \frac{1}{2} \right) + \left( RU \left( \frac{mm}{cm} \right) * H3 * \frac{1}{3} \right)$$

---

## ESTIMATION DE PRODUCTION PRAIRIALE

L'objectif de l'estimation du potentiel de rendement prairial est d'évaluer l'impact de l'ombrage et du stress hydrique sur le potentiel de production, paramètres impactés par l'installations de panneaux solaires au-dessus de la prairie.

Le premier modèle de prairie est basé sur le calcul de la productivité primaire en kg MS/ha.

Cependant dans le cas de l'utilisation de cette biomasse pour l'alimentation animale comme fourrage, Lemaire (1991) définit également la production récoltable de biomasse vivante tel que :

$$production\ récoltable\ biomasse\ vivante = production\ primaire - sénescence$$

La sénescence correspond à la sénescence foliaire, c'est-à-dire à la dégradation des feuilles de la plante qui ont atteint leur durée de vie maximale. En l'absence de récolte, la capacité photosynthétique des feuilles est perdue (Duru et al., 2010).

---

<sup>12</sup> Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p

<sup>13</sup> ARVALIS (2020) Outils de pilotage de l'irrigation par aspersion des grandes cultures : de l'indicateur à la méthode

L'intérêt de cette estimation est d'une part de pouvoir à la fois comparer la production en zone agrivoltaïque au regard de la zone témoin. D'autre part, cela permet d'évaluer la variabilité et l'évolution du rendement dans un futur proche en prenant en compte le changement climatique.

La modélisation utilise les connaissances solides issues de la recherche portée par l'INRA et notamment de Gilles Lemaire, Michel Duru et Marie-José Cros.

## RAYONNEMENT ET PRODUCTION DE BIOMASSE

Les graphiques ci-dessous (Figure 28) montrent des relations linéaires entre la biomasse de fétuque élevée produite et le rayonnement intercepté (Lemaire, 1991<sup>14</sup>). Au printemps, 1 MJ (ou 280 Wh) permet la production de 1,88 g de MS/m<sup>2</sup> ou 6,7 g MS/kWh/m<sup>2</sup>.

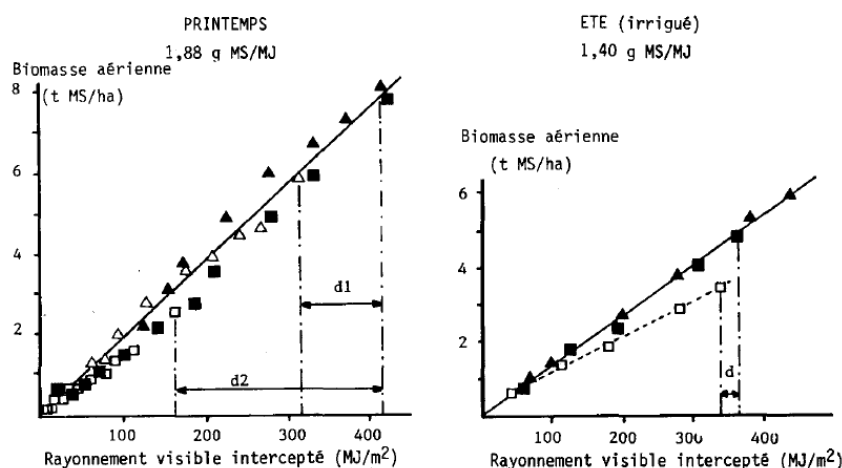


**Figure 33. Relation entre accroissement de biomasse aérienne et quantité de rayonnement intercepté par un peuplement de fétuque élevée (Source : Lemaire, 1991)**

La production de biomasse est directement liée et proportionnelle ( $r^{15}=0,98$ ) avec le PAR intercepté. La quantité de matières MS est alors donnée par une relation linéaire :

$$MS \text{ en g/m}^2 = k \times PAR_i \text{ en MJ/m}^2$$

Avec k étant le coefficient d'ajustement spécifique à chaque culture.

**Ce coefficient est de 1,93 (+/- 0,08) pour les graminées, soit le ray-grass et la fétuque et de 1,72 (+/- 0,10) pour les légumineuses, donc le trèfle.**

<sup>14</sup> G. Lemaire. (1991). Productivité des peuplements prairiaux : caractérisation et diagnostic. Station d'Écophysiologie des Plantes Fourragères, I.N.R.A., F-86600 Lusignan. Fourrages 127, 259-272.

Duru, M. et al. (2009) Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. Ecological Modelling 220, 209–225.

<sup>15</sup> Le coefficient de corrélation  $r^2$  est une valeur sans unité comprise entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, et plus la relation linéaire est forte.



Il est donc possible de prendre en compte l'impact de l'ombrage des panneaux sur la production primaire de la prairie, afin de vérifier si le rayonnement est un facteur limitant du rendement.

## RELATION ENTRE TEMPERATURE, INDICE FOLIAIRE ET EFFICIENCE D'INTERCEPTION DU RAYONNEMENT

Une relation entre Indice Foliaire (IF)<sup>16</sup> et efficacité d'interception du rayonnement  $E_i$  a été mise en évidence (Lemaire, 1984). La valeur de  $E_i$  est fonction de l'état de développement des surfaces foliaires. A partir d'un indice foliaire de 3, le couvert végétal intercepte 80 % du rayonnement visible incident. Cette captation atteint ensuite un plafond (Figure 29).

L'effet de la température sur le développement de la prairie, calculé avec la somme des degrés-jours, est pris en compte au niveau de l'indice foliaire.

$$E_i = 0,95 (1 - e^{-0,6 * IF}), \text{ avec } IF = b. \sum T$$

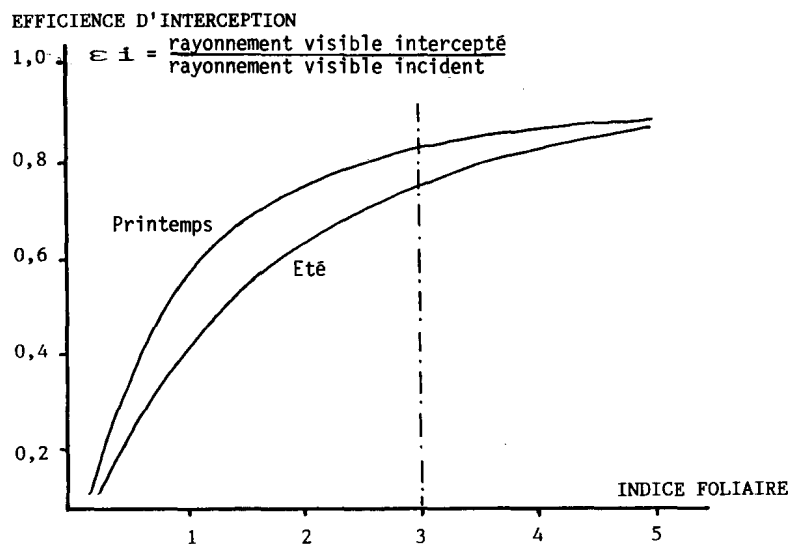


Figure 34. Évolution de l'efficacité d'interception du rayonnement visible par un peuplement de graminées en fonction de l'indice foliaire. (Lemaire, 1984)

L'efficacité d'interception du rayonnement est liée à l'indice foliaire de la prairie, qui elle-même s'accroît avec les degrés-jours cumulés.

<sup>16</sup> Exprime la surface projetée de feuilles du peuplement par unité de surface au sol.