



# Le projet agrivoltaïque de Sermentizon : Etude technico-économique





## SOMMAIRE

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Sigles .....                                                             | 5  |
| I. Introduction .....                                                    | 6  |
| A. Le projet et l'exploitation en bref .....                             | 6  |
| B. Un cadre réglementaire pour l'agrivoltaïsme .....                     | 6  |
| II. Etat de l'art de l'agrivoltaïque d'élevage .....                     | 8  |
| A. Les fondements théoriques .....                                       | 9  |
| 1. Naissance du concept .....                                            | 9  |
| 2. Principes de base d'un système agrivoltaïque .....                    | 9  |
| B. Une diversité de designs agrivoltaïques potentiels .....              | 10 |
| 1. Leviers technologiques d'optimisation du design .....                 | 11 |
| 2. Leviers spatiaux d'optimisation du design .....                       | 14 |
| C. Agrivoltaïsme et animaux d'élevage .....                              | 16 |
| 1. Influence sur le comportement au pâturage .....                       | 16 |
| 2. Influence sur le bien-être des animaux .....                          | 17 |
| D. Agrivoltaïsme et productions fourragères .....                        | 20 |
| 1. Effets sur le microclimat et les conditions pédologiques .....        | 20 |
| 2. Effets sur la croissance et le rendement des espèces prairiales ..... | 21 |
| 3. Capacité d'adaptation des espèces prairiales à l'ombrage .....        | 24 |
| III. Fonctionnement de l'exploitation .....                              | 26 |
| A. Description des surfaces .....                                        | 27 |
| B. Gestion du troupeau de bovins allaitants .....                        | 28 |
| 1. Reproduction du troupeau .....                                        | 29 |
| 2. Gestion de l'alimentation .....                                       | 30 |
| C. Gestion du troupeau d'ovins allaitants .....                          | 31 |
| 1. Reproduction du troupeau .....                                        | 31 |
| 2. Gestion de l'alimentation .....                                       | 32 |
| D. Organisation du pâturage .....                                        | 32 |
| E. Evaluation théorique de la capacité d'affouragement .....             | 34 |
| F. Productions .....                                                     | 35 |
| G. Matériels et bâtiments .....                                          | 36 |
| IV. Mise en place du projet agrivoltaïque .....                          | 37 |
| A. Les enjeux climatiques .....                                          | 37 |





|    |                                                                          |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Le bien-être animal .....                                                | 37 |
| 2. | La pousse de l'herbe .....                                               | 38 |
| B. | Présentation de la parcelle visée par le projet .....                    | 39 |
| C. | Présentation du design retenu pour ce projet.....                        | 41 |
| D. | Aménagements et entretien.....                                           | 45 |
| E. | Gestion du pâturage.....                                                 | 46 |
| F. | Installation de la prairie et préconisations du mélange à semer.....     | 47 |
| V. | Economie de l'exploitation .....                                         | 48 |
|    | Présentation et objectifs de l'étude .....                               | 48 |
| A. | Situation initiale .....                                                 | 48 |
| 1. | Les équilibres économiques générés par l'activité .....                  | 48 |
| 2. | Les équilibres de trésorerie .....                                       | 52 |
| 3. | Les équilibres financiers .....                                          | 53 |
| 4. | Conclusion intermédiaire .....                                           | 54 |
| B. | Prévisionnel économique .....                                            | 55 |
| 1. | Les paramètres de l'étude .....                                          | 55 |
| 2. | Projection des produits .....                                            | 56 |
| 3. | Projection de l'EBE .....                                                | 59 |
| C. | Notion de revenu durable .....                                           | 60 |
| D. | Conclusion de l'étude économique prévisionnelle .....                    | 60 |
|    | Conclusion sur le projet : réponses aux attentes de l'agrivoltaïsme..... | 61 |
|    | Annexes.....                                                             | 63 |
|    | Définitions .....                                                        | 63 |
|    | Références.....                                                          | 65 |





## Droits d'usage

Ce rapport et son contenu sont protégés et leur utilisation est strictement encadrée.

### Protection du contenu du rapport.

Conformément à l'article L. 151-1 du Code de commerce et suivants, tous les contenus présentés dans le présent rapport, et notamment la base de données documentaires, les développements, savoir-faire et méthodologies sont confidentiels et sont la propriété exclusive de DAVELE.

La base de données documentaires et le contenu du rapport sont également protégés au titre des articles L. 341-1 suiv. du Code de la Propriété Intellectuelle et des dispositions légales et réglementaires relatives aux droits d'auteur.

### Autorisation octroyée par DAVELE.

DAVELE met à disposition de Virya Energy ces informations confidentielles dans le cadre de prestations de conseil faisant l'objet d'un devis. Virya Energy et son personnel s'engagent donc à respecter et faire respecter une stricte obligation de confidentialité et, notamment, à exclusivement communiquer ces informations aux tiers directement concernés par le projet et les services désignés au devis.

### Interdiction et sanction des utilisations non-autorisées.

Toute autre utilisation, qu'il s'agisse notamment de divulgation, reproduction, communication sous toutes ses formes, est strictement interdite.

DAVELE se réserve le droit d'engager des poursuites judiciaires devant tout tribunal compétent afin d'obtenir réparation de son préjudice.

CONFIDENTIEL





## SIGLES

---

### **AOC / AOP**

L'Appellation d'Origine Contrôlée et l'Appellation d'Origine Protégée désignent des produits issus d'un terroir, et sont généralement le gage d'un produit de meilleure qualité, avec des débouchées économiques plus intéressantes.

### **MS**

La Matière Sèche est la quantité de la biomasse totale d'une culture produite sur la base du poids sec (lorsque l'eau est retirée du produit). Elle permet notamment d'avoir une base de calcul pour le rationnement des animaux

### **SAU**

La Surface Agricole Utilisée comprend les terres arables, les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes. Elle peut s'évaluer à l'échelle d'un territoire ou d'une exploitation.

### **UGB**

L'Unité de Gros Bétail est employée pour pouvoir comparer ou agréger des effectifs animaux d'espèces ou de catégories différentes.

### **UTH**

L'Unité de Travailleur Humain représente le travail fourni par une personne occupée à temps complet sur l'exploitation pendant une année. Elle correspond à une capacité de travail disponible.

### **ZIP**

La Zone d'Implantation du Projet correspond à la zone identifiée pour l'installation potentielle du projet.





## I. INTRODUCTION

### A. LE PROJET ET L'EXPLOITATION EN BREF

Virya Energy fait alors appel à DAVELE, un bureau d'études en agrivoltaïsme d'élevage, pour l'aider à mettre en place un système agrivoltaïque vertueux sur la commune de Sermentizon dans le Puy-de-Dôme (63) sur l'exploitation dénommée GAEC de La Ferme du Pré Fleuri et gérée par Laurent et Marianne STRACH.

C'est au Salon International de l'Agriculture à Paris, alors qu'il tenait un stand de vente des produits de la ferme, que Laurent STRACH a découvert l'agrivoltaïsme. Il souhaiterait mettre en place un tel projet sur certaines de ses parcelles de prairie permanente et temporaire qui accueillent aujourd'hui 25 de ses vaches allaitantes conduites en plein-air intégral. Le projet permettrait d'apporter un complément de revenu au couple mais également d'assurer un confort thermique supplémentaire aux vaches notamment lors des mises-bas en période estivale.

Notons que cette étude a été débutée en 2024, certains éléments présentés peuvent donc reprendre des données antérieures à 2026.

### B. UN CADRE REGLEMENTAIRE POUR L'AGRIVOLTAÏSME

En pleine transition énergétique, la France s'est fixée des objectifs ambitieux de production d'énergie renouvelable au travers de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie 2019 - 2028 (PPE). En plein essor, la production d'énergie solaire photovoltaïque française atteint en 2023 une puissance de production de 17,2 GW. Au travers de cette nouvelle PPE, la filière se voit challengée pour atteindre à court terme un objectif de production de 31,5 à 44 GW d'ici 2028. Pour voir encore plus loin, lors d'un discours tenu en février 2022 à Belfort, le Président de la République fixe l'objectif ambitieux d'une production d'au moins 100 GW de photovoltaïque en 2050.

Afin de répondre à de tels objectifs, la filière photovoltaïque aspire à investir les vastes surfaces que représentent le foncier agricole français. C'est ainsi que naît le concept d'agrivoltaïsme.

Relativement récent, ce concept se voit doté pour la première fois d'un cadre réglementaire au travers de l'Article 54 de la loi relative à l'Accélération de la Production des Energies Renouvelable (APER), publié au Journal Officiel (JO) au premier trimestre 2023. Pour la première fois, cette loi munit expressément l'agrivoltaïsme d'une définition législative.



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** (Art. L. 314-36. I- du Code de l'Energie).

Est considérée comme agrivoltaïque une installation qui apporte directement à la parcelle agricole au moins un des services suivants [...] \* :

1° Amélioration du potentiel et/ou de l'impact agronomique,





- 2° Adaptation au changement climatique,
- 3° Protection contre les aléas,
- 4° Amélioration du bien-être animal.

Garantissant [...] une production agricole significative et un revenu durable (Art. L. 314 – 36. I-).

\* A noter que ne seront pas considérées agrivoltaïques des installations qui portent une atteinte substantielle à l'un des services, ou une atteinte limitée à deux des services.



La publication du décret d'application concernant les installations agrivoltaïques le 8 avril 2024 vient clarifier un certain nombre de points. Ce décret précise notamment les modalités de définition et d'acceptation des projets agrivoltaïques, les contrôles et les sanctions associés, ainsi que les aspects liés à l'urbanisme. Par conséquent, nos études seront réalisées en parfaite conformité avec cette nouvelle définition de l'agrivoltaïsme et ses exigences, dans le but de promouvoir des projets vertueux et respectueux pour les filières d'élevage françaises.

CONFIDENTIEL





## II. ETAT DE L'ART DE L'AGRIVOLTAÏQUE D'ELEVAGE

Un état de l'art est un état des lieux d'un domaine scientifique donné à une date spécifique : il répertorie et présente les travaux scientifiques existants et synthétise leurs conclusions (validées par des pairs). Ainsi, il permet de présenter les différentes technologies étudiées dans ledit domaine, les avancées scientifiques ou encore les protocoles d'expérimentation. L'état de l'art présenté ci-après traite de l'agrivoltaïsme d'élevage et présente un ensemble d'articles scientifiques aussi exhaustif que possible concernant la connaissance scientifique dans ce domaine, commentés par le bureau d'études DAVELE. Il présente la plus grande variété possible de technologies existantes à date (ici mai 2024), ainsi que les certitudes apportées par les différentes expérimentations menées sur différents designs. Il est essentiel de noter qu'il s'appuie exclusivement sur de la littérature scientifique (et non de la littérature technique, par exemple). Aussi, aucune expérimentation non-publiée dans une revue scientifique à comité de lecture, donc non-revue par la communauté scientifique, ne figure dans cet état de l'art.

L'agrivoltaïsme est une filière émergente, en construction, au futur prometteur mais dont les retours expérimentaux sont encore trop peu nombreux.

De nombreuses innovations sont apparues ces dernières années, faisant de l'agrivoltaïsme un nouvel outil pour l'agriculture. Nous pouvons citer par exemple l'agrivoltaïsme dynamique développé par la société Sun'Agri ou les panneaux verticaux par Next2Sun, et tous les systèmes appliqués à la viticulture, l'arboriculture ou le maraîchage. Une revue rapide des différentes technologies développées ou à l'étude sera présentée.

Concernant les avancées scientifiques et techniques, nous nous intéresserons aux résultats relatifs au microclimat d'un système agrivoltaïque, à la production d'herbe et de fourrage en système agrivoltaïque prairial ainsi qu'à la production animale en système agrivoltaïque. Ainsi, les études concernant les systèmes agrivoltaïques couplés à d'autres productions végétales (grandes cultures, vignes, arbres fruitiers...) ne seront pas présentées ici puisqu'elles ne relèvent pas de cultures pâturables par les animaux. Ces études impliquant une production prairiale représentaient seulement 4% des études réalisées en agrivoltaïsme fin 2022 (Widmer et al. 2024).

De fait, l'agrivoltaïsme appliqué à l'élevage reste encore peu étudié et les retours d'expérience peuvent parfois entretenir la confusion entre éco-pâturage sur centrale au sol et véritable agrivoltaïsme d'élevage.

Les constats présentés par la suite, touchant aux interactions entre les panneaux photovoltaïques et les systèmes d'élevages, sont la base sur laquelle nous travaillons et sur lesquels sont fondées nos recommandations pour aider au développement des projets et créer, à l'image du végétal, un véritable service des panneaux photovoltaïques pour l'activité d'élevage.





## A. LES FONDEMENTS THEORIQUES

### 1. Naissance du concept

Le concept à l'origine de l'agrivoltaïsme naît en 1982 (Goetzberger et Zastrow, 1982) dans une publication où les auteurs imaginent combiner une production d'énergie solaire avec des cultures végétales en Allemagne. Cette idée cherche à répondre à la problématique, déjà présente à l'époque, de compétition pour l'occupation des sols entre production d'énergie et agriculture. Le système qu'ils proposent vise à maintenir 2/3 de l'irradiation pour les plantes, soit 33 % d'ombrage au maximum.

Cependant, il faut attendre les années 2000 pour que le premier système combinant panneaux photovoltaïques et cultures voit le jour au Japon, grâce à Akira Nagashima. Appelé « Solar Sharing », ce système est basé sur une ombrière construite sans béton, permettant la mécanisation, sur une parcelle en maraîchage (Nagashima, 2005).

Le terme « Agrivoltaïsme » n'apparaît finalement qu'en 2011 dans une publication de Christian Dupraz (Dupraz *et al.*, 2011), à l'occasion de la mise en place d'une centrale solaire expérimentale à Montpellier (34).

Le 10 mars 2023, une définition législative du terme « installation agrivoltaïque » a été validée dans la loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables. Selon cette loi, il s'agit d'une « installation de production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil, 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 » (Journal Officiel du 11 mars 2023).

Pour accompagner et renseigner le développement de cette filière, on ne compte aujourd'hui qu'une poignée de publications en agrivoltaïsme ciblant l'animal et la prairie : sur 54 publications relatives à l'acquisition de données expérimentales en agrivoltaïsme fin 2022, seulement 3 évaluaient la possibilité d'élevage en système agrivoltaïque (Widmer *et al.*, 2024). Depuis, quelques publications supplémentaires paraissent peu à peu. L'agrivoltaïsme adapté aux systèmes d'élevage en est donc à ses balbutiements et nécessite encore un travail rigoureux de recherche pour identifier les structures photovoltaïques et les méthodes agronomiques les plus adaptées.

### 2. Principes de base d'un système agrivoltaïque

Un système d'élevage est « un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé par l'homme en fonction de ses objectifs pour faire produire et se reproduire un collectif d'animaux domestiques en valorisant et renouvelant différentes ressources » (Dedieu *et al.* 2008). En pratique, il est constitué - entre autres - de trois volets qui interagissent et déterminent sa viabilité, et donc sa rentabilité :

- Volet microclimatique ;
- Volet fourrager ;
- Volet animal.

Chacun de ces volets peut être impacté par l'exploitant agricole de diverses manières :

- Gérer et renouveler le troupeau ;
- Gérer et renouveler les ressources fourragères ;





- Assurer l'adéquation entre dynamiques des ressources et du troupeau dans le temps (sans forcément l'assurer à chaque instant).

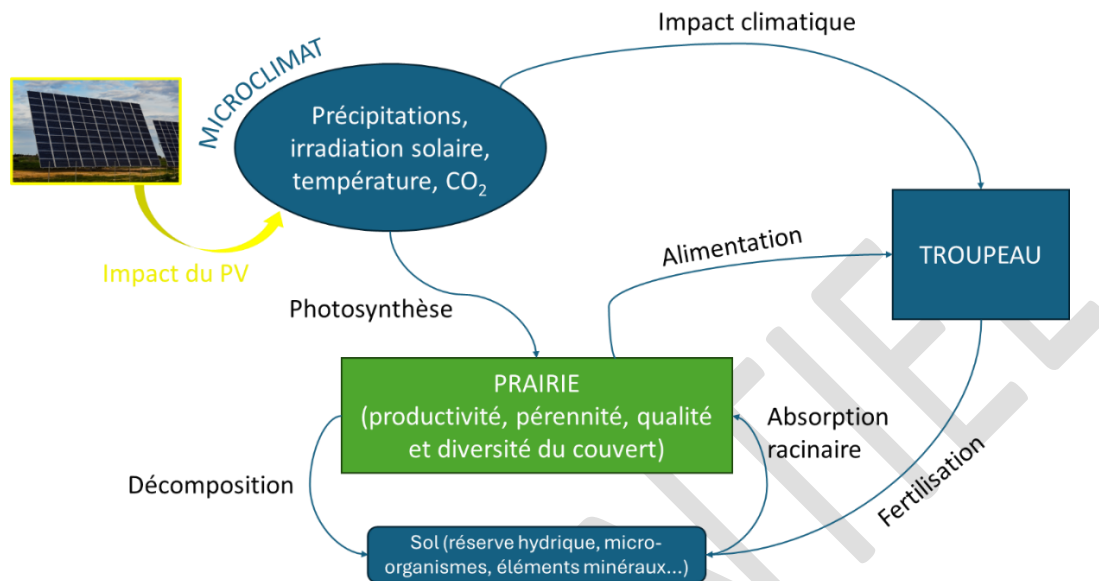


Figure 1 : Interactions entre panneaux photovoltaïques et système agricole (DAVELE)

La présence d'une structure photovoltaïque dans ce système prairial couvrant une plus ou moins grande partie des surfaces le constituant et avec des configurations très variées (hauteur de bas de table, technologie fixe/dynamique/verticale, espacement entre les tables...) implique des perturbations physiques de l'environnement avec des conséquences sur le microclimat de la parcelle, le travail de l'éleveur, les déplacements et le bien-être des animaux, la pousse de la végétation (Figure 1). L'action de l'éleveur devra, entre autres, s'adapter aux changements entraînés par la présence de la structure agrivoltaïque. C'est pour cela qu'il est essentiel de pouvoir connaître ces impacts.

## B. UNE DIVERSITE DE DESIGNS AGRIVOLTAÏQUES POTENTIELS

La conception d'un design agrivoltaïque est le résultat d'une combinaison de choix sur différents paramètres. Lors de cette conception, un design agrivoltaïque se distingue d'un design photovoltaïque par la volonté d'optimisation de la production agricole de la parcelle, volonté d'importance nécessairement équivalente – sinon supérieure – à celle d'optimisation de la production électrique. En effet, un design ne pourra être considéré agrivoltaïque si les choix de conception ont volontairement été faits aux dépens de la production agricole. L'impact du design choisi est considéré par les éleveurs comme un des principaux obstacles à la production agricole en agrivoltaïsme (Pascaris *et al.*, 2020). La technologie et la configuration choisies sont donc des considérations de premier ordre pour assurer le maintien de l'activité d'élevage.

Afin d'optimiser la production agricole, différents leviers existent lors de la conception du design. Ces leviers sont des paramètres de design modifiables et soumis au choix du développeur. Le tableau ci-dessous regroupe les différents leviers étudiés dans la littérature :





| Engineering   |                                                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------|
| Tracking      | Dual Axis<br>North/South<br>West/East<br>Bifacial              |
| PV            | Concentrated<br>Thin Film<br>Transparent<br>Spectral Selective |
| System Layout |                                                                |
| Placement     | Density<br>Spacing<br>Patterned (i.e., Checker-board)          |
| Orientation   | Height<br>Vertical Panels<br>Tilt Angle                        |

Figure 2 : Leviers d'optimisation d'un design agrivoltaïque (Reasoner et Ghosh 2022)

Des études sont venues quantifier l'impact de certains leviers sur la production agricole des systèmes agrivoltaïque. En l'état actuel des connaissances, ces leviers n'ont pas encore été tous comparés. Par exemple, une étude peut s'intéresser à la production prairiale sous panneaux à 1m de bas de table et une autre étude à la production fourragère sous panneaux à 3m de bas de table mais aucune étude ne comparera ces deux configurations sur une même prairie au même moment ; et donc ne pourra conclure sur l'effet direct du levier « hauteur de bas de table ». Nous nous attellerons néanmoins à présenter les résultats des études quant à l'impact du design sur le système agricole.

### 1. Leviers technologiques d'optimisation du design

Une étude s'est penchée sur l'effet de différents designs sur l'irradiation reçue au sol par la parcelle (Perna *et al.*, 2019). Trois types de panneaux ont été étudiés : panneaux classiques, panneaux organisés en « damiers » tous les 15 cm et panneaux organisés en « damiers » tous les 30 cm. Ces trois types ont été testés dans deux configurations différentes : fixe orienté Sud ou tracker Est-Ouest. Il est à noter que ces panneaux damiers sont équivalents aux panneaux appelés « semi-transparents » par les constructeurs de panneaux photovoltaïques, où les cellules sont séparées les unes des autres par des espaces transparents en verre. Les résultats des simulations d'irradiation sont présentés ci-dessous.



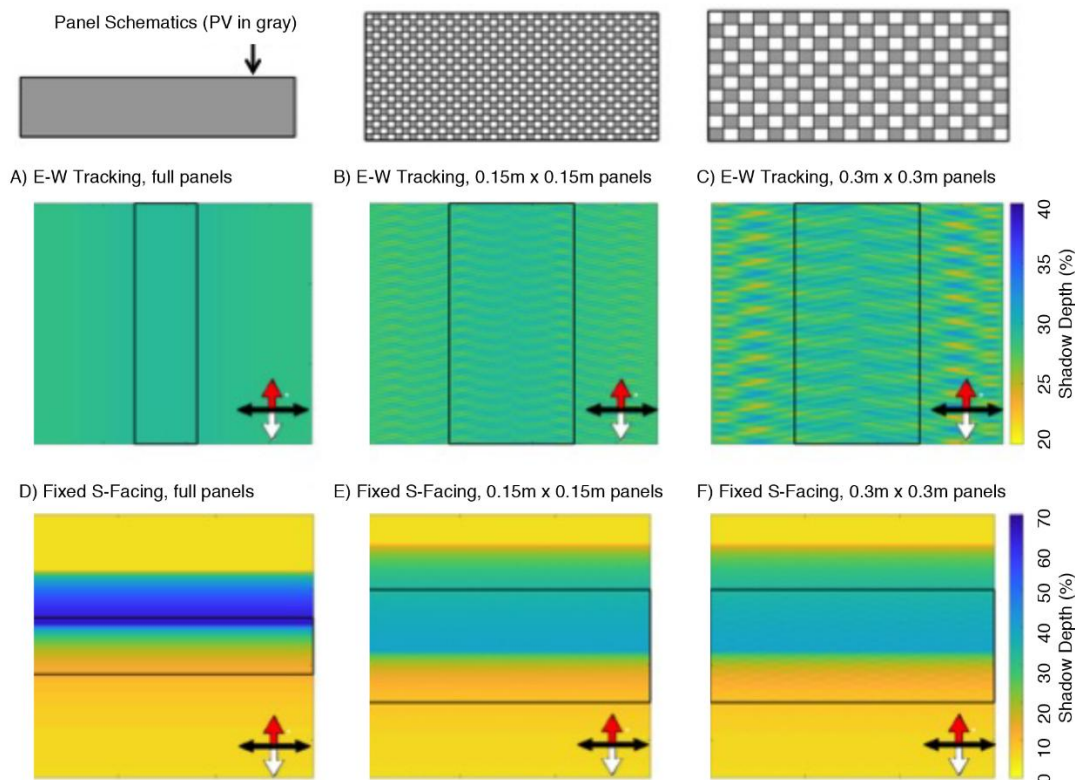


Figure 3 : Taux d'ombrage (réduction de l'irradiation intégrée sur une journée) spatialisé pour des systèmes de tracker Est-Ouest (A-C) et fixe orienté Sud (D-F) à Fresno, Californie. Les dimensions des champs sont 6 x 7m. La longueur des lignes est de 7m et la largeur est de 1,5m pour (a-d) et 3m pour (b-c-e-f) ; les bordures des tables sont représentées en noir. La surface photovoltaïque est identique dans tous les champs. (Perna et al., 2019)

Il est à noter que le taux d'ombrage « Shadow Depth » a été calculé par intégration sur 24h de la réduction de l'irradiation. Ce taux d'ombrage sera donc supérieur si l'on s'intéresse uniquement à la réduction de l'irradiation sur les heures d'ensoleillement. Nous nous intéresserons particulièrement dans cette partie à l'homogénéité de l'ombrage porté sur la prairie. En effet, pour les cultures, l'homogénéité de l'irradiation est cruciale pour de nombreuses pratiques agricoles. Une hétérogénéité d'ombrage entraîne un développement différencié de la prairie selon les zones et complexifie la gestion du pâturage. En effet, afin de déterminer la période et le temps de pâturage des parcelles par les animaux, l'éleveur doit pouvoir apprécier les ressources disponibles.

Le tracker Est-Ouest montre une meilleure homogénéité comparée à la configuration fixe inclinée vers le Sud, suggérant potentiellement des rendements améliorés pour de nombreuses cultures. (Perna et al., 2019).

Des lignes de modules Nord-Sud sont préférables aux lignes de modules Est-Ouest car elles contribuent à une meilleure homogénéité de l'irradiation, et diminuent ainsi le taux d'ombrage (Perna et al., 2019).

On remarque également que pour une même surface totale de panneaux, l'utilisation de mini-modules type damier améliore nettement l'homogénéité en système fixe et diminue les taux d'ombrage maximaux. Cette organisation de panneaux est donc fortement recommandée en agrivoltaïsme sur des structures fixes.

Ces conclusions sur les systèmes « damiers » sont corroborées par une autre étude ayant comparé les panneaux damiers avec les panneaux dont les modules sont partiellement transparents (modules qui ne limitent pas le passage de certaines longueurs d'onde utiles à la photosynthèse) (Seyedpour Esmaeilzad et al., 2024).





Les panneaux damiers ont ainsi montré de meilleurs résultats quant à l'homogénéité de l'ombrage et à l'irradiation globale au sol que les panneaux dont les modules étaient plus ou moins transparents (de 33 à 66% de transparence).

La productivité électrique de certaines technologies a aussi été comparée. Les résultats ont montré qu'une productivité électrique peut être maintenue tout en augmentant également l'irradiation disponible au sol (Sánchez Ortiz *et al.*, 2023). Ainsi, en comparant un système fixe à 2,1m en point bas de table avec 8m de distance inter-tables (norme DIN SPEC 91434 allemande) et un système tracker journalier avec les mêmes caractéristiques, les résultats montrent que le rendement énergétique est amélioré sur le système tracker tout en augmentant également l'irradiation globale reçue au sol et ainsi les possibilités photosynthétiques.

Enfin, un nouveau type de design a été dimensionné puis testé en conditions réelles en Corée du Sud. Ce design utilise des panneaux dits « pliants » (*foldables*) selon le principe schématisé ci-dessous :

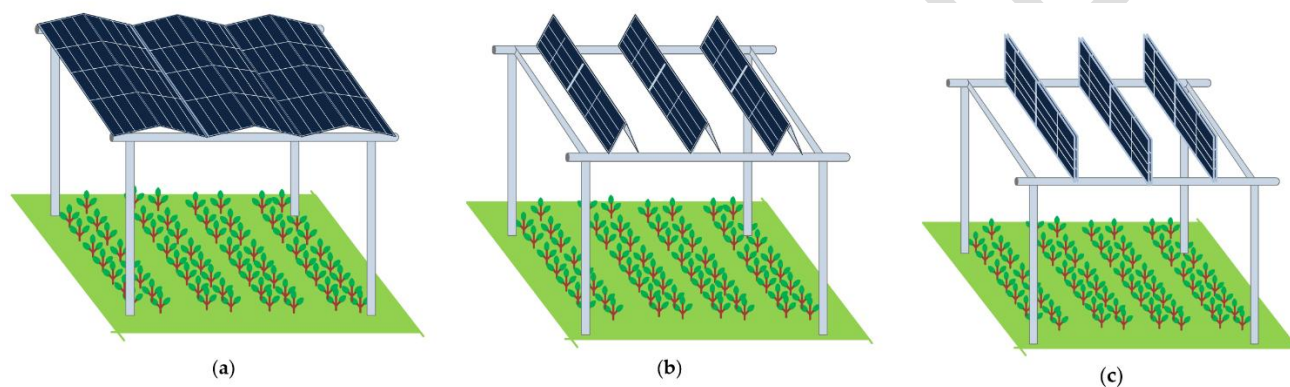


Figure 4 : Illustration du concept de système agrivoltaïque avec panneaux pliants. (a) Ombrage total. (b) Ombrage partiel. (c) Ouverture complète. (Lama et Jeong 2024)

Ce design s'est montré très concluant d'un point de vue énergétique avec une augmentation de 15% de rendement électrique par rapport à un système fixe, un lissage de la production énergétique au cours de la journée par mise en position verticale en début et fin de journée et une diminution du nombre de pieux nécessaires par rapport à un système tracker classique. D'un point de vue agricole, ce design permet l'ajustement de la position des panneaux à un angle de 10° en hiver pour la protection contre le gel, à la verticale au printemps pour une irradiation maximale du couvert à la période de pousse, et à 0° pendant les heures chaudes de l'été pour protéger les prairies de la sécheresse.





## EN RESUME

- Les systèmes trackers sont à privilégier
- Dans le cas de systèmes fixes, une organisation en damiers des panneaux permet d'améliorer l'homogénéité de l'ombrage
- Des technologies moins conventionnelles telles que les panneaux pliables peuvent être une ressource intéressante pour les projets
- Une augmentation de l'irradiance disponible au sol pour la parcelle n'est pas synonyme de baisse de production électrique !

## 2. Leviers spatiaux d'optimisation du design

D'un point de vue agricole, les différentes technologies peuvent être séparées selon 2 catégories : les systèmes élevés appelés « overhead » ou souvent « ombrières » d'un côté (schéma a) et les systèmes bas appelés « interspaced » ou « ground-mounted » (schémas b et c) où la possibilité de culture est limitée aux zones entre les rangées de modules. Les caractéristiques de ces deux catégories sont schématisées ci-dessous :

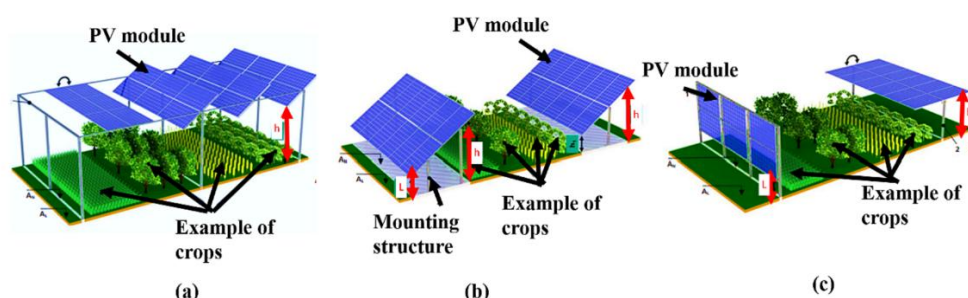
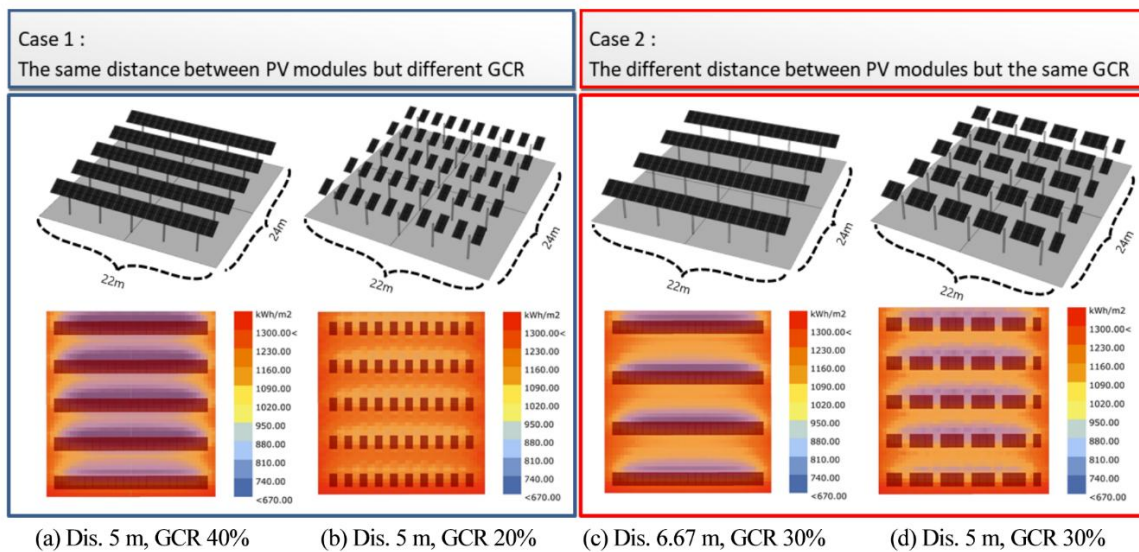


Figure 5 : Illustration schématique de systèmes APV dans le cadre de la norme DIN SPEC 91434. (a) Système PV élevé avec une hauteur de dégagement  $> 2,1\text{m}$ , (b-c) Systèmes PV inter-rangées avec une hauteur de dégagement  $< 2,1\text{m}$ . Image par Fraunhofer ISE, 2022. (Ghosh, 2023).

L'impact de différentes configurations spatiales a pu être étudié sur une même parcelle de légumes (Marrou *et al.*, 2013), de maïs (Sekiyama et Nagashima, 2019) ou de riz (Gonocruz *et al.*, 2021) mais aucune à notre connaissance n'a étudié cet impact de la configuration spatiale choisie sur une production prairiale ou fourragère.

Plus généralement, on peut donc citer une étude coréenne ayant modélisé les irradiances reçues au sol selon différentes distances entre modules et différents taux de couverture. Les configurations suivantes ont été testées (la hauteur de bas de panneaux est fixée à 3 m) :





| Evaluation item                                             | Cases | Case 1                |                       | Case 2                   |                       |
|-------------------------------------------------------------|-------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
|                                                             |       | (a) Dis. 5 m, GCR 40% | (b) Dis. 5 m, GCR 20% | (c) Dis. 6.67 m, GCR 30% | (d) Dis. 5 m, GCR 30% |
| Overall irradiation mean under PV modules [%]               |       | 66.5                  | 83.4                  | 74.2                     | 75                    |
| Overall standard irradiation deviation under PV modules [%] |       | 12.1                  | 6.2                   | 11.1                     | 9.1                   |

Figure 6 : Résultats de modélisation de l'irradiation selon différents espacements de modules et taux de couverture (désigné par GCR - Ground Coverage Ratio) (Kyung-Soo, 2021)

L'irradiation moyenne (Overall irradiation mean) renseigne sur la quantité d'irradiation disponible en moyenne au sol. L'écart-type (Overall standard irradiation deviation) renseigne sur la répartition de cette irradiation, c'est-à-dire sur l'homogénéité ou non de l'irradiation à l'échelle de la parcelle.

On remarque tout d'abord et sans surprise l'influence du taux de couverture sur l'irradiation disponible en moyenne au sol : plus le taux de couverture est élevé, moins il y aura d'irradiation disponible au sol, ce qui peut affecter négativement la pousse des végétaux qui repose (entre autres) sur l'utilisation de la lumière (photosynthèse, réchauffement de la plante ...). A taux de couverture égaux, la disposition des panneaux (lignes continues ou espacées) ne semble pas avoir d'impact significatif.

De façon analogue aux panneaux « damiers » (ou semi-transparents) évoqués dans le II.B.1 ci-dessus, on constate que l'utilisation de lignes discontinues de panneaux diminue l'écart-type et favorise donc une meilleure homogénéité de l'ombrage. Ce constat s'observe par ailleurs à GCR égal. Il est à noter que ces écarts de résultats sont moindres du fait que la structure considérée a une hauteur de bas de panneaux de 3m, une hauteur améliorant d'ores et déjà l'homogénéité de l'irradiation en comparaison à une structure plus basse.

En conclusion, le design de la centrale a un impact extrêmement significatif sur l'ombrage apporté à la parcelle, et donc sur la production agricole. Différentes technologies photovoltaïques sont disponibles (panneaux fixes, trackers, damiers, panneaux pliants ...), et les structures à privilégier sont celles permettant une meilleure homogénéité de l'ombrage sous les panneaux. L'innovation a toute sa place dans ce secteur, et il a été démontré que l'optimisation de la production agricole n'est pas synonyme de détérioration de la production d'électricité. Ces structures ayant pour vocation d'être implantées pour plusieurs dizaines d'années, l'ingénierie à la conception est primordiale afin de concilier au mieux les deux productions.





Afin de faciliter cette conception, les études scientifiques se multiplient pour tenter de quantifier les impacts d'une structure agrivoltaïque sur la production agricole. La suite du document présente les études publiées à ce jour et traitant de l'impact d'une structure agrivoltaïque donnée sur le microclimat de la parcelle, des animaux d'élevages pâturant sur site et/ou sur une production fourragère.

#### EN RESUME :

- Les interruptions entre les lignes de tables permettent une meilleure répartition de l'irradiation sous les tables
- Un GCR élevé diminue l'irradiation disponible pour les plantes, pouvant affecter négativement leur développement.

## C. AGRIVOLTAÏSME ET ANIMAUX D'ELEVAGE

### 1. Influence sur le comportement au pâturage

Dans une étude parue en novembre 2022 et menée en Californie, il a été montré que des ovins sous panneaux photovoltaïques pâturent davantage que ceux pâturant dans une prairie témoin (Kampherbeek *et al.*, 2023). Cette étude a été menée sur un site équipé de panneaux en système tracker solaire et à environ 1,10m du sol en point bas. Lorsque les ovins sont en parcelles photovoltaïques, ils passent davantage de temps couchés à ruminer que lorsqu'ils sont en prairie témoin. L'étude a été menée en janvier, le rayonnement solaire n'était donc pas extrême, toutefois, les ovins ont significativement passé volontairement plus de temps sous les panneaux qu'entre les allées, que ce soit pour se coucher et ruminer ou pour pâturer. En effet, lorsqu'ils sont en prairie témoin, les ovins sont parfois debout et immobiles, un comportement significativement moins présent dans les parcelles photovoltaïques. Les panneaux semblent les protéger des mauvaises conditions, telles que la pluie ou le vent. Cependant, des recherches étendues à différentes saisons et sous différents climats permettraient de généraliser ces observations à tout système agrivoltaïque.

Marcone *et al.* (2021) ont conclu que les moutons peuvent souffrir de stress thermique dans des conditions modérément chaudes. Leurs recherches ont montré que 54 % des brebis laineuses recherchent l'ombre lorsque la température moyenne de l'air dépasse 19°C dans un pays de haute latitude (Estonie). Ces observations sont cohérentes avec celles de Knight (2023), qui a analysé l'effet de l'ombre sur les moutons en pâturage en été en Australie du Sud-Est. Les moutons sans ombre présentaient un comportement de recherche d'ombre (près des clôtures ou des abreuvoirs,  $P < 0,001$ ). Schutz (2024) a observé les réponses comportementales et physiologiques des moutons avec et sans accès à l'ombre en été en Nouvelle-Zélande (climat tempéré). Les moutons à l'ombre ont utilisé cette ressource 25,7 % du temps, et ce pourcentage a augmenté avec l'intensité du rayonnement solaire. Dans un autre contexte, l'étude de Maia *et al.*, (2020) menée près de São Paulo, au Brésil, a démontré que les moutons passaient 38 % de leur temps sous des panneaux photovoltaïques et que cette proportion passait à près de 70 % lorsque le rayonnement solaire était égal ou supérieur à 800 W/m<sup>2</sup>. Bien que les conditions climatiques diffèrent entre la Nouvelle-Zélande et le Brésil, ces résultats confirment l'importance de l'accès à l'ombre pour les moutons face à des niveaux de rayonnement solaire plus élevés, montrant ainsi des réponses similaires dans deux régions aux climats contrastés.





Une autre étude menée en Oregon sur une durée d'un an s'est intéressée à la croissance des agneaux élevés sous panneaux photovoltaïques ainsi qu'à leur consommation d'eau (Andrew *et al.*, 2021). Les résultats de cette étude soulignent un gain de poids vif quotidien semblable pour les agneaux des deux traitements (avec et sans panneaux) bien que la biomasse disponible soit plus faible dans les prairies sous panneaux. En effet, des différences jusqu'à 30% de biomasse en moins sous les panneaux ont été notées en fin de période estivale. Cependant ces différences de quantité de biomasse ne peuvent pas être ici directement attribuées à la présence de panneaux car le pâturage des parcelles n'a pas été arrêté en même temps lors de la période de pâturage précédente. En revanche, les analyses de composition végétale montrent une valeur plus nutritive pour les prélèvements sous panneaux. Cette augmentation de la valeur nutritive semble donc compenser la baisse de masse observée puisque les gains de poids vif sont similaires. Une autre piste soulevée dans l'article est la baisse de stress thermique diminuant de fait l'énergie nécessaire à la régulation thermique de l'agneau. Finalement, il a également été observé que les agneaux sous panneaux ont moins consommé d'eau lors du printemps 2019 mais cette observation n'a pas été retrouvée lors du printemps 2020.

#### EN RESUME :

Les études précédentes sont encore trop spécifiques et leurs résultats ne peuvent être étendus facilement, cependant ils permettent d'émettre les hypothèses suivantes qui seront à confirmer lors de suivis scientifiques :

- Les panneaux peuvent offrir un espace de confort pour les animaux pour leur permettre de se reposer, de ruminer et de pâturer
- Les panneaux peuvent permettre de diminuer la consommation d'eau des animaux
- Les panneaux ne semblent pas impacter le gain de masse des animaux directement (ils l'impacteront probablement à travers leur impact sur la végétation)

## 2. Influence sur le bien-être des animaux

Le bien-être des animaux dépend d'un ensemble de facteurs pouvant s'apprécier par la règle des 5 libertés :

- 1) **absence de faim et de soif ;**
- 2) **absence d'inconfort ;**
- 3) **absence de douleur, de blessure ou de maladie ;**
- 4) **absence de peur et de détresse ;**
- 5) **possibilité d'exprimer les comportements normaux de l'espèce** (Phythian *et al.*, 2011).

D'un point de vue réglementaire, on peut considérer un système comme agrivoltaïque s'il améliore le bien-être des animaux du système. Cette amélioration du bien-être est actuellement étudiée principalement d'un point de vue de la diminution de l'inconfort thermique par l'apport d'ombrage.





Chez les mammifères, le stress thermique est un facteur pouvant fortement impacter leur bien-être ainsi que la productivité (diminution de la croissance, de la fertilité, de la production laitière...) (Lenis Sanin *et al.*, 2016). Un état de stress thermique chronique impacte également la qualité de la carcasse et son poids (Gonzalez-Rivas *et al.*, 2020).

L'étude de Biswal *et al.* (2021) a montré que les conditions de stress thermique affectent de manière significative la croissance, la production, le rendement laitier, la consommation d'aliments, les performances reproductives et d'autres fonctions biologiques des petits ruminants.

Or, avec une hausse estimée de température moyenne annuelle allant jusqu'à +2 °C en France à l'horizon 2050, le stress thermique est une préoccupation avérée pour les conditions futures d'élevage. Comme l'est la température ambiante, l'irradiation directe des animaux par les rayonnements solaires est également un facteur aggravant de stress thermique (Lenis Sanin *et al.*, 2016). Face à une situation de stress thermique, les mammifères ont tendance à éviter l'exposition directe au rayonnement solaire, à diminuer leur consommation alimentaire et leur activité physique (Lenis Sanin *et al.*, 2016). Ainsi, l'effet positif d'un ombrage sur le bien-être et la qualité de la viande de moutons (poids, conformation et état d'engraissement) au pâturage est connu et significatif (Marai *et al.*, 2007 ; Liu *et al.*, 2012 ; Panagakakis, 2016).

Au Brésil, un dispositif a testé pendant 20 jours l'effet de la présence d'une structure photovoltaïque sur le stress thermique ressenti par les ovins (Fonsêca *et al.*, 2023). Pour une structure photovoltaïque de 20m<sup>2</sup> à 3m de hauteur au point bas et une inclinaison de 15°, l'activité et la température corporelle de 9 moutons ont été monitorées. Les résultats ont montré que pour les journées où l'irradiance dépasse 500 W/m<sup>2</sup>, les animaux recherchent activement l'ombre de la structure et la température à la surface de leur peau est diminuée de 1 à 2°C par rapport aux animaux sans accès à l'ombrage. De plus, la charge de chaleur radiante des brebis était inférieure de 30 % lorsqu'elles se trouvaient sous les panneaux solaires, comparativement à une exposition directe au soleil. Cette préférence pour l'ombre s'est particulièrement illustrée au cours des mois d'avril et de mai, où les agneaux ont passé respectivement 96,1 % et 96,5 % de leur temps d'inactivité sous les panneaux solaires. Cette étude a été menée en conditions tropicales, toutefois, une étude semblable a été menée par Davele à l'été 2023 sur le Plateau du Larzac et a montré des résultats similaires : les animaux recherchaient activement l'ombre des panneaux et présentaient des signes de stress thermique (fréquence respiratoire) diminués par rapport aux animaux sans accès à l'ombrage.

Ce phénomène est également observé dans l'étude de Marcone *et al.*, 2021, où les brebis halètent moins et mangent et ruminent davantage lorsqu'elles se trouvent à l'ombre. De même que Knight, 2023, qui a montré que l'accès à l'ombre a réduit leur fréquence respiratoire à midi (64 respirations/min contre 98 respirations/min,  $P < 0,0001$ ), sans impact sur la température corporelle, la fonction immunitaire ou la croissance.

Du côté des bovins, un dispositif expérimental de 2 rangées de panneaux fixes à 2,4 m de hauteur de bas de panneaux et inclinés à 35° vers le sud a été le support d'une étude sur le stress thermique ressenti au sein de deux lots de vaches dans le Minnesota (Sharpe *et al.*, 2021). Cette étude a montré l'intérêt de l'ombre des panneaux photovoltaïques pour la diminution du stress thermique et de la température corporelle des vaches de manière significative. Pour chaque augmentation de 1°C de la température de l'air, la température corporelle des vaches sans accès à l'ombrage augmentait de 0,041°C contre une augmentation de 0,015°C chez les vaches ayant accès à l'ombre des panneaux. De cette même étude, Heins (2022) a examiné l'effet de l'ombre procurée par des panneaux photovoltaïques dans un système de pâturage laitier.





Les vaches ayant accès à l'ombre sous les panneaux avaient des taux de respiration plus faibles (66,4 respirations/min contre 78,3 respirations/min), ainsi que des températures corporelles plus basses l'après-midi (39,0°C contre 39,3°C). Elles passaient également moins de temps à s'activer (6,7 min/h contre 7,8 min/h), possiblement en raison de comportements de regroupement réduits. Toutefois, les vaches à l'ombre avaient le ventre et les pattes inférieures plus sales (2,2 et 3,2, respectivement) que les vaches sans ombre (1,9 et 2,9, respectivement). Le sol plus frais et plus humide sous les panneaux solaires, combiné à la réduction de la dispersion des vaches, a accentué les conditions de saleté.

En ce qui concerne les monogastriques, l'étude de Noiro-Cosson *et al.* (2024) montre que les trackers améliorent le microclimat en réduisant la température du sol et de l'air (-4,1°C et -3,3°C) et en augmentant l'humidité (+7,5% et +5,6%). L'exposition au rayonnement y est également diminuée (-53%), comme sous les arbres (-60%). Les conditions de confort y étaient plus fréquentes qu'en zone de contrôle, et même supérieures à celles sous les arbres sur le site B (69% vs 12%). Les poules pondeuses privilégiaient ces zones ombragées, avec une fréquentation du tracker comparable aux grands arbres sur le site A.

Les panneaux peuvent également favoriser un meilleur bien-être animal en servant d'abri contre la pluie et en protégeant les animaux de pâturage des intempéries (Maia *et al.*, 2020 ; Andrew *et al.*, 2021 ; Clean Energy Council, 2021). De plus, les installations solaires ombragent la zone située directement en dessous, offrant ainsi une option d'ombrage similaire à l'ombre naturelle des arbres, ce qui permet d'atténuer le risque de stress thermique et d'améliorer le bien-être et la productivité du bétail qui paît sous les panneaux (Maia *et al.*, 2020).

La modélisation de Gill *et al.* (2024), basée sur les conditions de l'État de Victoria, en Australie, a révélé plusieurs effets bénéfiques du pâturage sous panneaux solaires sur le microclimat et le bien-être des animaux. Le microclimat créé par les panneaux solaires a réduit la vitesse du vent d'environ 30 %, offrant ainsi un abri climatique aux animaux. Ce phénomène a été particulièrement marqué dans les conditions froides, avec une amélioration de la survie des agneaux grâce à la réduction du refroidissement par le vent et à la protection contre la pluie. L'étude a également montré que la température du sol sous les panneaux était plus basse de 9°C pendant les mois les plus chauds, ce qui contribue à réduire le stress thermique des animaux. De plus, lorsque la pluie coïncide avec la mise bas, le risque de mortalité des agneaux est significativement plus élevé dans les zones ouvertes, mais sous les panneaux solaires, ce risque est réduit à un niveau proche de la normale, grâce à la protection offerte par les structures. La clôture des sites solaires offre également une protection contre les prédateurs dans les environnements où la prédation du bétail est un problème (Gill *et al.*, 2024).

Les systèmes agrivoltaïques présentent donc des résultats prometteurs quant à la diminution du stress thermique des animaux au pâturage. Il est à noter que cependant, ces études portent sur des structures avec un bas de table relativement haut (minimum 2,4 m de bas de table). Leurs résultats ne peuvent pas être étendus pour des tables plus basses.

Toutefois, l'appréciation du bien-être animal suppose le suivi de l'ensemble des 5 critères le définissant. Or, à ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à une évaluation de tous les aspects du bien-être animal en système agrivoltaïque. Nous n'avons donc pas de données quant à l'impact d'un système agrivoltaïque sur d'autres critères, comme les blessures ou l'état de crainte des animaux.





Dans ce cadre, l'Institut de l'Élevage a élaboré un guide à destination des éleveurs et des gestionnaires des centrales photovoltaïques relatif à l'agrivoltaïsme appliqué à l'élevage des ruminants. Basé sur des retours d'expériences, l'Institut de l'Élevage préconise une hauteur minimale des panneaux afin de permettre la libre circulation des animaux permettant d'exprimer leur comportement naturel. Une hauteur suffisamment haute permet également de garantir la sécurité des animaux et d'éviter les risques de blessures. Il est également nécessaire de protéger et mettre en sécurité les équipements électriques pour éviter tout risque d'électrocution ou d'étranglement/pendaison.

#### EN RESUME :

- Une centrale agrivoltaïque suffisamment haute (bas de panneaux à 2,4m minimum) peut significativement limiter les impacts du stress thermique chez les animaux, permettant une amélioration du bien-être animal et de leur production
- Il n'existe pas encore d'études scientifiques étudiant d'autres aspects du bien-être animal en système agrivoltaïque
- Des guides rédigés par des organismes de référence proposent des recommandations sur le design et l'installation d'un système agrivoltaïque pour essayer d'anticiper les risques liés à la présence d'une centrale

## D. AGRIVOLTAÏSME ET PRODUCTIONS FOURRAGERES

### 1. Effets sur le microclimat et les conditions pédologiques

La croissance végétale est directement conditionnée par le microclimat d'une parcelle ; à savoir l'irradiation reçue, les températures journalières, la pluviométrie, la disponibilité en CO<sub>2</sub> ... La structure agrivoltaïque est une perturbation physique de l'environnement entraînant potentiellement des changements sur le microclimat.

Plusieurs études sur des systèmes aux configurations diverses convergent sur une diminution nette de la température du sol sous les tables en période estivale (Marrou *et al.*, 2013; Armstrong *et al.*, 2016; Adeh *et al.*, 2018; Weselek *et al.*, 2021). Ces études tendent à montrer un effet tampon de la couverture photovoltaïque par diminution des extrema de température du sol.

Concernant l'humidité, des études ont cherché à modéliser les dynamiques hydriques en champ solaire. Ces modélisations ont mis en lumière la complexité des mécanismes d'évapotranspiration et d'écoulement de l'eau (Ali Abaker Omer *et al.*, 2022). En se basant sur des données réelles, les résultats sont variables : de nombreuses études montrent l'augmentation d'humidité du sol sous panneaux et au niveau de la « gouttière » en bas de panneaux (Andrew *et al.*, 2024) tandis que d'autres études ne montrent une augmentation de l'humidité du sol qu'au niveau de la gouttière et une diminution dans le reste des zones du champ (Yavari *et al.*, 2022).

Au niveau aérien, les maximales de températures apparaissent diminuées sous les tables en cas de très fortes chaleurs (Pang *et al.*, 2019).





Les températures moyennes de l'air ne sont pas statistiquement différentes entre les différentes zones du champ en système fixe à 1,1m de bas de table (Andrew *et al.*, 2024). Ces températures sont en revanche statistiquement inférieures dans les zones sous panneaux en système fixe à 5m de bas de table (Weselek *et al.*, 2021).

Les impacts du système agrivoltaïque sur le microclimat semblent très dépendants du microclimat initial de la parcelle. Ainsi, en climat très sec et très chaud où l'irradiation n'est pas limitante, le système agrivoltaïque semble pouvoir améliorer l'humidité et la température du sol de façon propice à la production agricole tandis qu'en climat tempéré, les inconvénients liés à la diminution de l'irradiation risquent de prévaloir sur les potentiels améliorations d'humidité ou de température (Weselek *et al.*, 2021). Toutefois, en climat tempéré, le système agrivoltaïque peut devenir avantageux dans un contexte d'augmentation de la récurrence des sécheresses due au changement climatique.

#### EN RESUME :

L'impact d'une structure agrivoltaïque sur le microclimat est très dépendant du microclimat initial de la parcelle ainsi que de la structure photovoltaïque, mais on observe :

- Une diminution des extrema de température du sol
- Une augmentation de l'humidité du sol dans la zone de la « gouttière » sous les panneaux
- Un impact sur l'humidité du sol sous les panneaux, avec une augmentation ou une diminution de celle-ci selon les études
- Une diminution de la température de l'air sous panneaux sous des structures hautes (5m bas de table)

## 2. Effets sur la croissance et le rendement des espèces prairiales

Une étude a été menée sur une parcelle accueillant une culture de trèfle et une centrale photovoltaïque avec des trackers orientés sud-ouest. Les caractéristiques des panneaux sont les suivantes : bifaciaux, une hauteur de 5 m en bas de panneaux, et une inter-rangée de 6,3 m (Weselek *et al.*, 2021). Il a été montré que la production était significativement affectée : le rendement a été diminué de 6,5 % en moyenne en parcelle APV même lors d'années sèches. De plus, la hauteur des plants et la surface des feuilles étaient significativement augmentées en parcelle APV. Ces observations résultent d'une stratégie d'adaptation des plantes à l'ombrage mais ces observations n'ont pas été toujours accompagnées d'une augmentation de matière sèche.

Une étude réalisée sur des surfaces non pâturées a par ailleurs mis en évidence une augmentation de 90% de la production de biomasse par unité de surface en système APV (Adeh *et al.*, 2018). Cette étude a été menée sur un système fixe de panneaux à 1,1m de bas de table et 6 m d'inter-rangée.

En système de panneaux fixes orientés sud à 1,1 m au point bas et 6 m d'inter-rangée, la production prairiale de matière sèche a été réduite d'environ 9 à 33 % par rapport au lot témoin, principalement du fait d'une réduction de 50 % de la matière sèche dans les zones sous-panneaux (Andrew *et al.*, 2021).





Cette réduction s'explique principalement par la réduction de la lumière disponible en zone sous panneaux. En effet, si l'on compare ces résultats avec le domaine de l'agroforesterie, parmi l'ensemble des facteurs influençant la production de biomasse, la lumière est le principal facteur limitant en conditions tempérées. A noter que cette réduction s'explique aussi par la fréquentation augmentée de ces zones par les animaux, ce qui détériore le couvert.

Du point de vue de la valeur nutritive de la prairie, les taux de protéines dans le fourrage étaient plus élevés en parcelle agrivoltaïque tandis que les taux de sucre et de cellulose y étaient diminués (Andrew *et al.*, 2021). L'augmentation de la qualité du fourrage pour les animaux a ainsi permis de compenser la perte de rendement. La production de viande a été similaire chez les agneaux au pâturage dans les parcelles sous panneaux et sans panneaux. Ainsi, il est recommandé de privilégier des espèces tolérantes à l'ombrage et au piétinement afin de limiter les pertes de biomasse tout en gagnant en qualité.

En 2024, une nouvelle étude menée sur ce même site agrivoltaïque a testé la productivité de différents mélanges prairiaux en centrale agrivoltaïque (Andrew *et al.*, 2024). Cette étude a semé des mélanges uniquement en zone « mi-ombre » et « soleil » et a considéré la zone « sous-panneaux » comme non exploitable. Il précise d'ailleurs que la diminution drastique de biomasse dans les zones « sous-panneaux » (soit 50% de la parcelle dans le cas de cette centrale) indique que ce type de design est hautement inefficace pour l'optimisation d'une production prairiale en système agrivoltaïque. Cependant, dans d'autres études sans pâturage par des animaux, des augmentations de biomasse ont été notées dans les zones « sous-panneaux ». L'auteur souligne donc l'importance des stratégies de gestion du pâturage afin de maximiser la production animale sans détériorer le couvert des zones sous-panneaux. Les résultats de cette étude sont résumés dans le schéma ci-dessous :

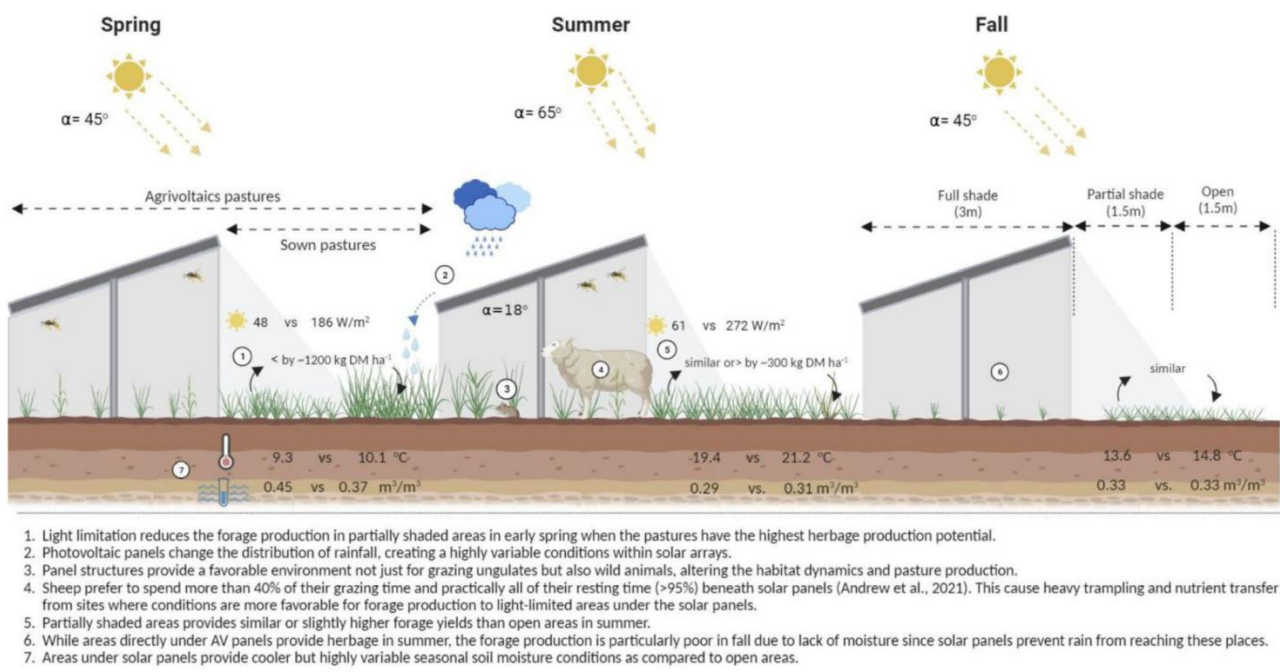


Figure 7 : Schéma récapitulatif des observations sur la production prairiale en système agrivoltaïque fixe à 1m10 de hauteur de dégagement (Andrew *et al.*, 2024).





Enfin, toujours dans la même étude, l'augmentation du nombre d'espèces semées a été bénéfique à la productivité mais la persistance des légumineuses est très faible : le mélange prairial principalement constitué de légumineuses n'a pas supporté le pâturage par les animaux en raison d'une densité de couvert trop faible dû au manque de luminosité dans les zones sous panneaux photovoltaïques. Cette observation faisant des graminées une famille de plantes plus résistante à l'ombrage a également été faite dans une autre étude réalisée au Royaume-Uni (Armstrong *et al.*, 2016). Le choix du mélange et la sélection de plantes résistantes à l'ombrage (graminées) peut donc être une stratégie pour augmenter le rendement fourrager dans les zones ombragées (Andrew *et al.*, 2024).

En système tracker, une étude française s'est intéressée à la production de luzerne en champ agrivoltaïque (Edouard *et al.*, 2023). La luzerne est une production souvent récoltée mais pouvant être aussi pâturée sur pied. Dans cette étude sur 2 années consécutives, une structure type tracker 2 axes à 4,5m de hauteur en centre de table et en lignes espacées de 12m a été utilisée. Les rendements de luzerne ont été très variables d'une année sur l'autre, allant de - 21 % en 2020 à + 40 % en 2021. Cette variabilité peut s'expliquer par une difficulté d'implantation de la prairie au printemps 2020 à cause de l'effet de rigole en bas de panneaux et également par des sécheresses prononcées à l'été 2020. Cependant, sur les deux années, le rendement en luzerne a eu tendance à être plus élevé en été sous les panneaux par rapport à la zone témoin (sans panneaux) (+46% en 2020 et +80% en 2021).

Globalement, des augmentations comme des diminutions de biomasse ont été documentées sous panneaux photovoltaïques et dépendent du contexte climatique des études. Dans les zones climatiques à irradiation solaire basse, une baisse de la densité du couvert et de la biomasse a été documentée sous panneaux en comparaison à l'inter-rangée ou à la zone témoin. Ces baisses étaient moins prononcées dans le cas de système tracker. Cependant, dans les zones climatiques à irradiation solaire élevée, des études ont documenté une meilleure efficacité hydrique par baisse de l'évapotranspiration et ainsi une augmentation de biomasse sous panneaux (Yavari *et al.*, 2022). Ces dernières études ont toutefois été menées sans présence d'animaux sur la parcelle.

#### EN RESUME :

- Les graminées semblent mieux résister à l'ombrage que les légumineuses : il est essentiel de proposer un mélange adapté à la centrale agrivoltaïque (ainsi qu'au sol, au microclimat local, et à l'utilisation de l'agriculteur !).
- Impact du système sur la production de biomasse très variable selon les zones des parcelles agrivoltaïques et selon les structures agrivoltaïques utilisées : nous manquons de retours scientifiques
- La composition chimique du couvert prairial est également modifiée par la présence de la structure photovoltaïque.
- Impossibilité de maintenir un couvert pâturable dans les zones sous panneaux avec une structure fixe trop basse à 1,10m de bas de table.





### 3. Capacité d'adaptation des espèces prairiales à l'ombrage

La réduction de l'irradiation solaire a un impact sur l'activité photosynthétique des plantes. Il est possible que cette réduction impacte négativement la photosynthèse (Marrou *et al.*, 2013) mais que cet impact soit positif en période de fort rayonnement grâce à une atténuation des conditions microclimatiques qui peuvent restreindre la photosynthèse (Barron-Gafford *et al.*, 2019). Le développement phénologique des plantes peut ainsi être impacté avec un décalage des périodes de floraison observées en zone sous panneaux par rapport aux zones ensoleillées (Graham *et al.*, 2021).

Les impacts du partage lumineux inhérent à un système agrilvoltaïque seront variables selon l'espèce végétale considérée. Certaines sont considérées « susceptibles » à l'ombrage, d'autres « tolérantes » à l'ombrage, tandis que d'autres « bénéficient » de l'ombrage. Selon la catégorie de résistance des plantes, les rendements seront respectivement proportionnellement diminués, notablement améliorés ou notablement détériorés avec l'augmentation de l'apport d'ombrage.

Ainsi, une modélisation des rendements en climats tempérés et tropicaux indique que les fourrages bénéficient de l'ombrage apporté jusqu'à un taux d'ombrage de 25% tandis qu'au-delà, les fourrages sont « tolérants » à l'ombrage. Cela signifie que les rendements diminuent proportionnellement à la réduction de l'irradiation sans chute brutale (Telangana State Agricultural University, Rajendranagar, Hyderabad, Telangana, India *et al.*, 2023). Les intervalles de confiance à 95% sont assez larges avec cette modélisation, les résultats sont donc à considérer avec précaution.

Cet impact du partage lumineux est dépendant du type de culture considéré et des espèces végétales présentes sur la surface. En prairie, une étude Suisse comparant différents espacements de panneaux sur une même ligne a observé que des espacements de 1m à 1,2m (environ 48% d'ombrage) entre chaque panneau d'une même ligne limitait la perte de rendement prairial par rapport à la parcelle témoin à 10% tandis que des espacements de 1,2m à 1,5m (environ 38% d'ombrage) limitait la perte de rendement prairial à seulement 5% par rapport à la parcelle témoin (Oleskewicz 2020). Cette étude a été menée sur un système fixe de panneaux orientés Sud à 2,3m de bas de table.

Dans le cadre de l'optimisation des systèmes agrilvoltaïques en climat tropical, une étude menée en Malaisie a évalué l'impact de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux photovoltaïques sur la production énergétique et agricole. En utilisant *Andrographis paniculata*, une plante médicinale tolérante à l'ombre, les résultats ont montré qu'une inclinaison de 8° et une orientation de 187° permettaient d'atteindre une irradiation solaire de 1819 kWh/m<sup>2</sup>/an, réduisant la lumière au sol de 40,92 % tout en améliorant les rendements agricoles. Cette configuration a également optimisé la performance des panneaux en abaissant leur température de 1,28 °C, ce qui a entraîné un gain de rendement de 0,82 % (Abidin *et al.*, 2023).





## EN RESUME :

- Des retards de floraison peuvent être observés en centrale agrivoltaïque, une prise en compte nécessaire dans l'organisation de l'agriculteur
- Chaque espèce végétale présente une tolérance différente à l'ombrage et présentera donc un développement sous panneaux différent
- Pour les plantes tolérantes à l'ombre, le taux d'ombrage de 40,92 % généré n'a pas seulement favorisé leur croissance, mais a également contribué à une augmentation de leurs rendements par rapport à une culture en plein champ.

CONFIDENTIEL





### III. FONCTIONNEMENT DE L'EXPLOITATION

L'implantation d'une centrale agrivoltaïque n'a pas vocation à modifier les pratiques actuelles des éleveurs ni leur production : la présente étude décrira donc le fonctionnement actuel de l'exploitation et les orientations souhaitées par les éleveurs, et détaillera l'utilisation du site agrivoltaïque.

La Ferme du Pré Fleuri, localisée au sein du Parc Naturel Régional du Livradois-Forez, élève 25 vaches allaitantes (race Limousine) et 180 ovins allaitants (race Rava) sous le label Agriculture Biologique sur un total de 123 ha de Surface Agricole Utile (SAU).

A l'origine, Laurent et Marianne STRACH se sont installés en 2004 sur 80 ha avec 68 vaches allaitantes de race Limousine. Le couple a par la suite souhaité diversifier son activité en développant des chambres d'hôtes et en élevant des chevaux de trait comtois en 2007 pour proposer une activité d'attelage aujourd'hui labellisée Tourisme Handicap. Le couple a également lancé des ventes directes de produits de la ferme en plus de la vente de leurs bovins à la coopérative Covidio Bovicoop, mais cette activité est aujourd'hui limitée à 2 ventes par an à cause de la hausse des cours qui a rendu la vente directe financièrement moins intéressante. L'activité chambre d'hôtes a elle aussi été stoppée dans la période post-covid car elle ne devenait plus assez rentable, notamment à cause de l'essor des logements Airbnb. En 2016, la totalité des surfaces de l'exploitation est passée sous appellation Agriculture Biologique. En 2017, le couple a poursuivi la diversification en ajoutant des ovins.

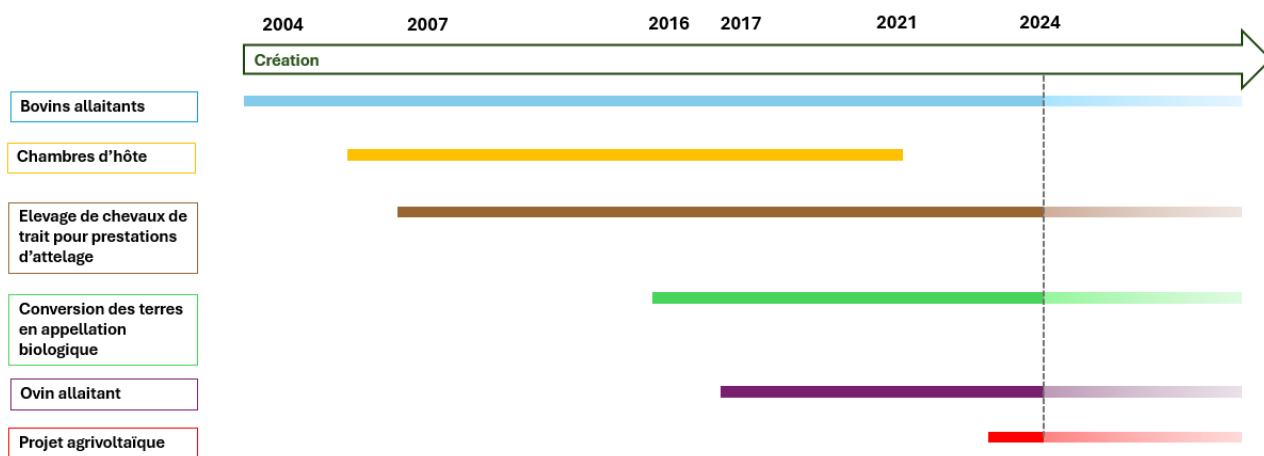


Figure 8 : frise historique de l'exploitation

L'étude du projet agrivoltaïque ci-dessous présente le fonctionnement de l'ensemble de l'exploitation tout en se concentrant particulièrement sur l'atelier bovin qui sera l'atelier principalement impacté par la mise en place du projet. Ainsi, nous présenterons dans un premier temps le fonctionnement actuel (pratiques d'élevages, de cultures, circuits de commercialisation, problématiques rencontrées...) afin de formuler dans un second temps des recommandations quant à l'implantation d'un projet agrivoltaïque (adaptations du design aux pratiques et aux problématiques de l'éleveur, aménagements nécessaires, bénéfices attendus...). Enfin, un tableau récapitulatif des impacts attendus de ce projet sur le fonctionnement agricole de l'exploitation clôturera l'étude.





## A. DESCRIPTION DES SURFACES

En 2023, le GAEC de la Ferme du Pré Fleuri déclare environ 123 ha de SAU à la PAC. La majorité des surfaces est en prairies permanentes et temporaires et une partie est en céréales. Aucune surface n'est irriguée ou drainée. Les prairies permanentes sont ensemencées avec un mélange dit « Suisse » présentant des capacités germinatives supérieures. Selon les exploitants, le type de sol des parcelles varie fortement : certaines parcelles présentent des sols argileux profonds et impraticables par les animaux en hiver, tandis que d'autres sont assez drainantes et peuvent supporter les animaux par temps pluvieux. Les parcelles de céréales sont quant à elles peu profondes, environ une vingtaine de centimètres. Elles sont dans l'ensemble moins productives que les terres de la plaine de Limagne au nord de la zone puisque l'exploitation se situe dans les franges montagnardes du Livradois. Laurent STRACH est principalement en charge des travaux culturaux et de l'atelier bovin au sein de l'exploitation.

Les productions sur les surfaces du GAEC de La ferme du Pré Fleuri se répartissent comme il suit :

Tableau 1 : répartition de l'assolement et rendements de l'exploitation

|                                             | Prairie permanente | Prairie temporaire | Mélange de céréales d'hiver | Seigle de printemps | Orge de printemps | Surfaces temporairement non admissible |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------------------|
| Surface en ha                               | 96,46 ha           | 17,06 ha           | 6,57                        | 0,6                 | 2,37              | 0,08                                   |
| Rendements moyens exploitation 2023         | 5,5 – 6 T MS/ha    | 6 – 6,5 T MS/ha    | 40 – 45 q/ha                | 4 – 4,5 T/ha        | 4 – 4,5 T/ha      | /                                      |
| Rendements départementaux 2023 <sup>1</sup> | 5,3 T MS/ha        | 5,6 T MS/ha        | 45 q/ha                     | /                   | 4,7 T/ha          | /                                      |

Par comparaison, les rendements du GAEC de la Ferme du Pré Fleuri apparaissent plutôt équivalents aux moyennes départementales tant pour les fourrages que pour les céréales. Ces chiffres témoignent d'une bonne maîtrise technique de la production végétale notamment dans cette zone géographique moins fertile que dans d'autres zones du département, comme celle de la plaine de la Limagne.

Les prairies temporaires sont majoritairement des prairies de luzerne ou des prairies permanentes retravaillées. Les céréales sont soit des mélanges d'hiver soit de l'orge ou du seigle. Elles sont en rotation avec la luzerne.

Chaque année, sont fauchés :

- 35 ha de prairie permanente qui permettent de produire 232 T de foin
- 5 ha de luzerne qui permettent de stocker 31 T de foin de luzerne

La production annuelle moyenne totale d'herbe à l'échelle de l'exploitation est de **690 T de MS**.

<sup>1</sup> <https://draaf.auvergne-rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/memento-edition-2023-a5093.html>





La répartition de la SAU en 2023 est représentée ci-dessous :

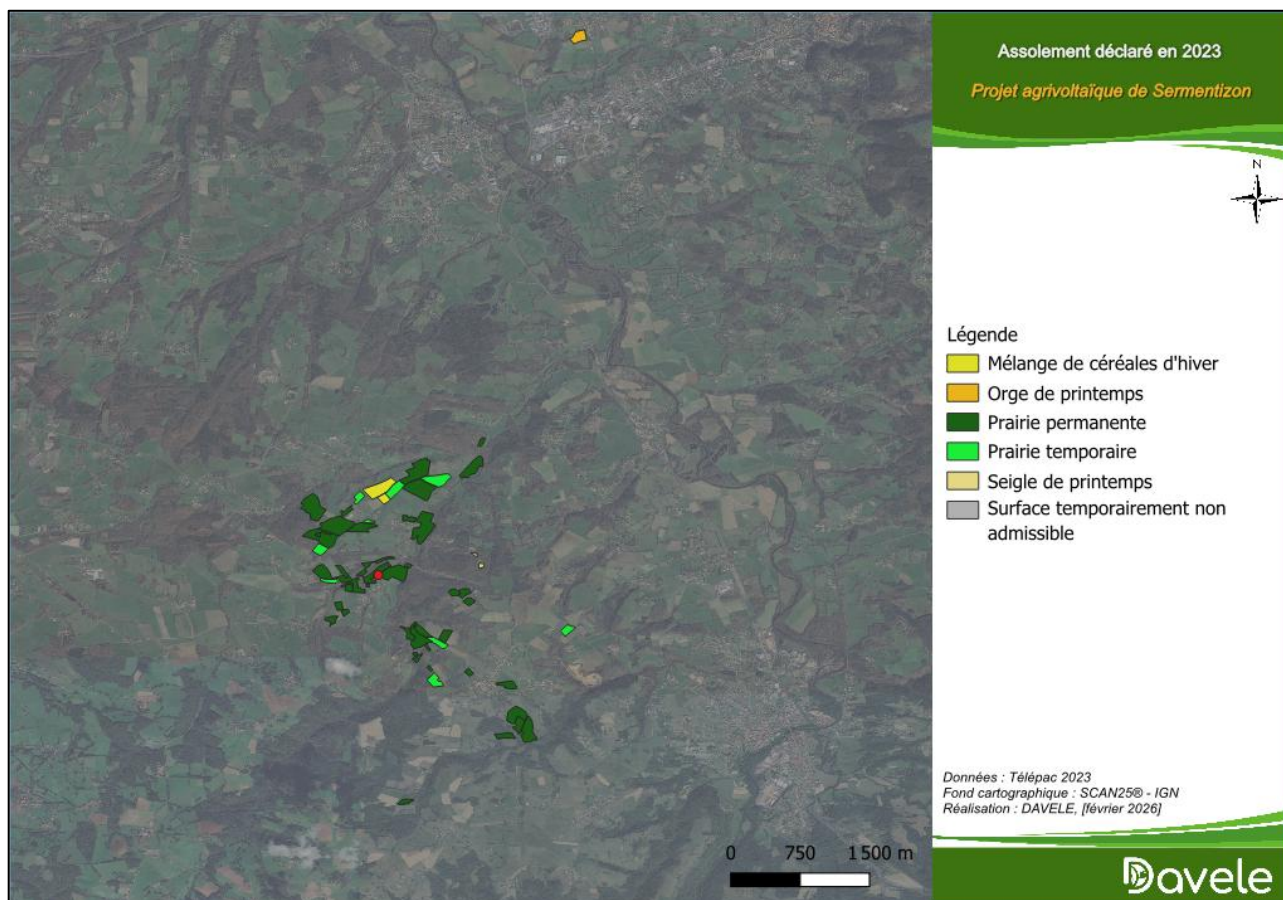


Figure 9 : cartographie de l'assolement de l'exploitation

## B. GESTION DU TROUPEAU DE BOVINS ALLAITANTS

Le troupeau de race Limousine est actuellement composé d'une trentaine de mères et d'un taureau. L'ensemble du troupeau constitue un cheptel de 73,5 UGB. Laurent STRACH est principalement en charge de l'atelier bovin. Le troupeau est actuellement en plein-air intégral : l'exploitation ne possède aucun bâtiment d'élevage pour les bovins. Les bovins ont des abris naturels (haies, arbres...) pour se protéger des intempéries ou des fortes chaleurs. Le plein-air intégral a toujours très bien fonctionné sur l'exploitation notamment d'un point de vue sanitaire : les éleveurs ont très peu de frais vétérinaires et quasiment aucun problème sanitaire. Toutefois, au mois de juin 2023, les éleveurs ont perdu exceptionnellement 3 veaux à quelques jours d'intervalle. D'après eux, ces pertes seraient probablement dues aux fortes chaleurs et à la présence importante de parasites. Le système de l'exploitation est donc de type extensif avec une autonomie sur la production de l'alimentation du troupeau.





## 1. Reproduction du troupeau

La reproduction se fait en monte naturelle tout au long de l'année. Sur les 25 naissances annuelles, entre 5 et 8 génisses sont conservées pour le renouvellement et le reste est vendu en génisses finies à 3 ans et demi. Les génisses de renouvellement seront mises à la reproduction un peu avant leurs 3 ans. Enfin, 11 broutards de 11 mois sont vendus tous les ans.

Les vaches à la reproduction sont réformées au cas par cas selon notamment leur santé et leur caractère maternel, il n'y a pas d'âge type pour la réforme. En rythme de croisière, il y a donc deux lots d'animaux : un lot reproducteur d'environ 30 têtes et un lot de jeunes (génisses + broutards de l'année) d'environ 40 têtes.

Ci-dessous un schéma démographique représentant le fonctionnement global du troupeau bovin :

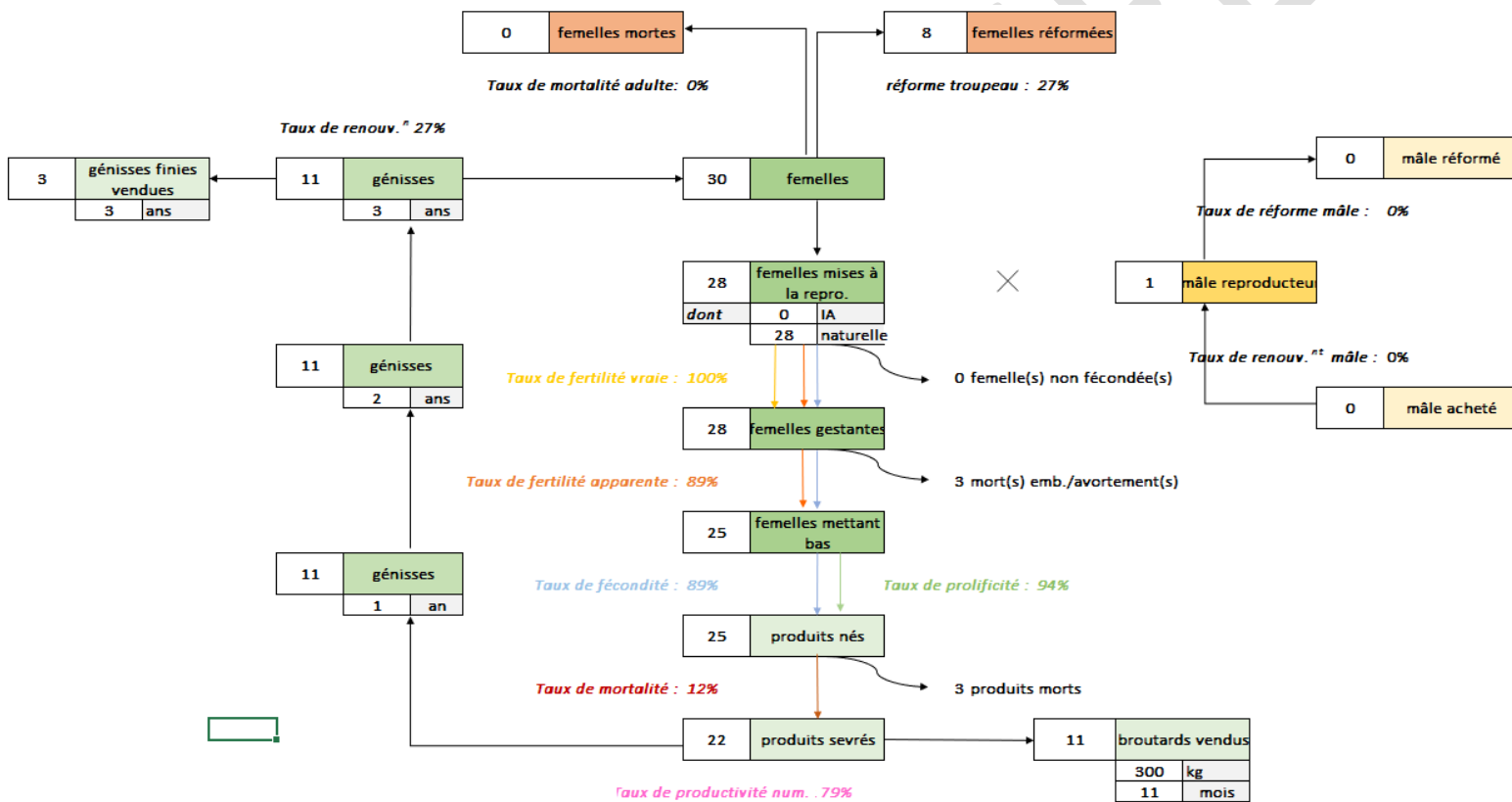


Figure 10 : schéma démographique simplifié des bovins

Nous remarquons un taux de renouvellement de 27 %, qui est supérieur au taux de renouvellement moyen des élevages de limousines suivis par Bovins Croissance en 2021<sup>2</sup> qui est de 23 %. Le taux de mortalité des veaux est également supérieur au taux de mortalité moyen des veaux allaitants en France<sup>3</sup> qui est de 8 % puisque l'exploitation a subi quelques pertes dues aux chaleurs en 2023.

<sup>2</sup> [https://idele.fr/?eID=cmis\\_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fb5f8aa94-8cfb-4418-a306-877e059d9c49&cHash=9b449560e1d0d9807ae2a55a0d7d2393](https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fb5f8aa94-8cfb-4418-a306-877e059d9c49&cHash=9b449560e1d0d9807ae2a55a0d7d2393)

<sup>3</sup> [https://idele.fr/pilotage-de-la-sante-des-ruminants/?eID=cmis\\_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F0b3cdf3b-6d65-4428-9b6c-9fe9ded8edf3&cHash=62796de7ec4ea1d1c454cd8a9cd05a6d](https://idele.fr/pilotage-de-la-sante-des-ruminants/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F0b3cdf3b-6d65-4428-9b6c-9fe9ded8edf3&cHash=62796de7ec4ea1d1c454cd8a9cd05a6d)





Le taux de mortalité moyen des vaches adultes est quant à lui de 0 %. Celui-ci est faible, ainsi moins d'une vache par an meurt sur l'exploitation (blessure, mammite, maladie...). On peut en conclure que le GAEC fait preuve d'une solide maîtrise technique.

## 2. Gestion de l'alimentation

Le système étant en plein-air intégral, l'alimentation se fait exclusivement au pré. Toutefois, le climat ne permet pas un pâturage tout au long de l'année : le troupeau est donc systématiquement affouragé au champ pendant l'hiver et ponctuellement l'été si besoin. En phase de finition des broutards et des génisses, les animaux sont généralement rentrés dans une case du bâtiment des ovins et des céréales leur sont distribuées.

Nous évaluons dans le tableau ci-dessous les besoins en fourrage du troupeau, calculés en tonnes de MS (matière sèche), et basés sur les méthodes de calcul **Strat'alim** développées par l'**Institut de l'Elevage**.

Tableau 2 : tableau récapitulatif des besoins du troupeau bovin

|                        | Consommation<br>journalière<br>moyenne par<br>animal<br>(kg MS/j) | Effectif | Temps<br>(j) | Besoins totaux<br>des animaux (kg<br>de MS) | Temps<br>d'affouragement (j) | Besoins sur la<br>période<br>d'affouragement (kg<br>de MS) |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Mères +<br>taureau     | 14                                                                | 30       | 365          | <b>153 300</b>                              | 180 (hiver) +<br>30 (été)    | <b>84 630</b>                                              |
| Génisses 1<br>an       | 6                                                                 | 11       | 365          | <b>24 090</b>                               | 180 (hiver) +<br>30 (été)    | <b>13 860</b>                                              |
| Génisses 2<br>ans      | 9                                                                 | 11       | 365          | <b>36 135</b>                               | 180 (hiver) +<br>30 (été)    | <b>20 790</b>                                              |
| Génisses 3<br>ans      | 12                                                                | 11       | 365          | <b>48 180</b>                               | 180 (hiver) +<br>30 (été)    | <b>27 720</b>                                              |
| Broutards –<br>de 1 an | 4                                                                 | 11       | 120          | <b>3 960</b>                                | 180 (hiver) +<br>30 (été)    | <b>9 240</b>                                               |
| <b>Total annuel</b>    |                                                                   |          |              | 265 665 soit <b>265<br/>T de MS</b>         |                              | 147 000<br>Soit <b>140 T de MS</b>                         |

En rythme de croisière, les besoins du cheptel s'élèvent à **265 T de MS** par an, pâture et affouragement confondus. Les besoins en fourrage conservé quant à eux sont de 140 T de MS par an.





## C. GESTION DU TROUPEAU D'OVINS ALLAITANTS

### 1. Reproduction du troupeau

La reproduction se fait à l'instar du troupeau bovin, en monte naturelle avec deux périodes de lutte et donc deux périodes de mise-bas : une en début d'hiver et une au printemps. Quatre béliers sont présents dans le troupeau : 3 béliers de race Rava et 1 bélier de race Hampshire afin d'améliorer la conformation des agneaux produits. Les agneaux, principaux produits de cet atelier, sont vendus à 35 kg.

Les brebis mettant bas en hiver sont rentrées en bâtiment 1 mois avant la mise bas et resteront en bâtiment pendant 1 mois tandis que les brebis mettant bas au printemps passent l'hiver dehors, agnellent au champ puis sont rentrées pendant 1 mois si elles ont deux agneaux ou restent dehors si elles n'en ont qu'un. Sur les 230 naissances annuelles moyennes, 20 agnelles sont conservées pour le renouvellement : elles sont choisies au sein des agnelles de race pure Rava. Ci-dessous, un schéma démographique représentant l'organisation du troupeau :

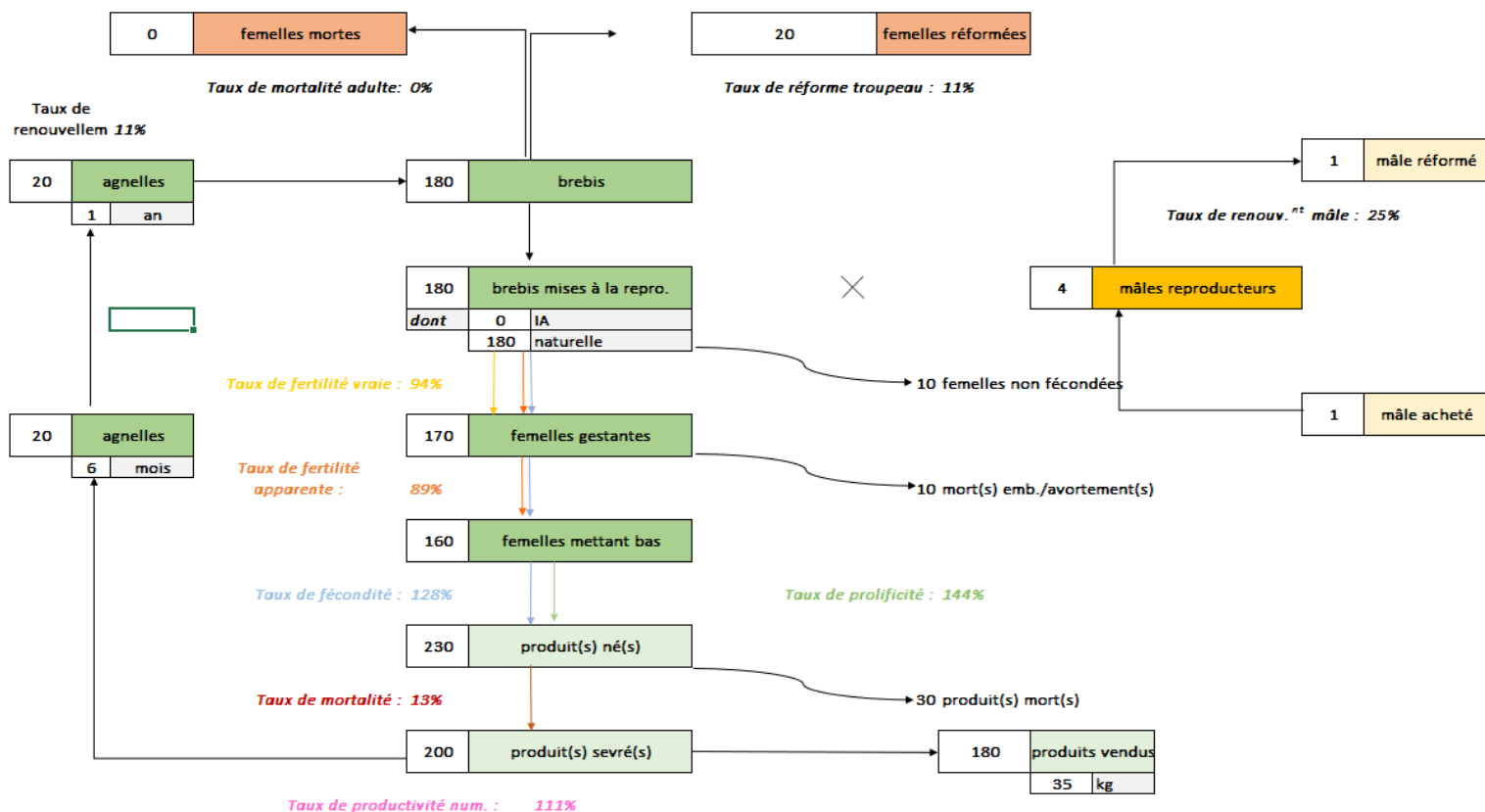


Figure 11 : schéma démographique simplifié ovin

Après la réalisation de cette étude, l'exploitation a subi des pertes dues à la FCO (fièvre catarrhale ovine). L'impact économique de ces pertes est décrit dans la partie V.B.





## 2. Gestion de l'alimentation

Le tableau ci-dessous récapitule les besoins en fourrage du troupeau ovin.

Tableau 3 : consommation journalière de fourrage par animal

|                               | Consommation<br>journalière<br>moyenne par<br>animal<br>(kg MS/j) | Effectif | Temps de<br>présence<br>(j) | Besoins<br>totaux<br>annuels<br>(kg de MS) | Temps<br>d'affouragement<br>(j) | Besoins sur la<br>période<br>d'affouragement<br>(kg de MS) |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Brebis et<br>béliers          | 2                                                                 | 184      | 365                         | 134 320                                    | 150                             | 82 200                                                     |
| Agnelles de<br>renouvellement | 0,5 à 1                                                           | 20       | 365                         | 7 300                                      | 150                             | 2 970                                                      |
| Total annuel                  |                                                                   |          |                             | 141 620 soit<br><b>141 T MS</b>            |                                 | 85 170<br>Soit <b>85 T MS</b>                              |

En rythme de croisière, les besoins du cheptel s'élèvent à **141 T de MS** par an, pâture et affouragement confondus, sans prise en compte du concentré distribué à l'engraissement des agneaux gras. Les besoins en fourrage conservé sont quant à eux de 85 T de MS par an. Les besoins des agneaux ne sont pas précisés dans le tableau car ils sont considérés comme négligeables, les quantités ingérées étant moindres.

### D. ORGANISATION DU PATURAGE

Peu de parcelles sont pâturées à la fois par le troupeau ovin et bovin. Les mères Limousines utilisent les parcelles du nord de l'exploitation (quartier orange sur la cartographie ci-dessous). Les génisses de renouvellement sont réparties entre les parcelles du Nord et celles du Sud (quartiers jaunes) tandis que les Rava pâturent les parcelles au centre de l'exploitation (quartier bleu). Au besoin, les brebis peuvent être amenées à pâturer les surfaces utilisées par les bovins au nord mais l'inverse n'est pas possible. En effet, il est nécessaire d'emprunter sur quelques centaines de mètres une route départementale, les éleveurs peuvent la traverser rapidement avec le troupeau de brebis mais ne souhaitent plus le faire avec les vaches par sécurité pour leurs animaux.

Au sein de chaque quartier de pâturage, les rotations à la parcelle ne sont pas clairement définies à l'avance mais au fur et à mesure de la période de pâturage en surveillant la hauteur d'herbe disponible. Dans le quartier des brebis, les brebis non rentrées en bâtiment vont pâturer sur les parcelles à proximité afin d'améliorer la surveillance et de faciliter l'affouragement. Les brebis seront ensuite emmenées sur les parcelles plus éloignées pendant l'été et l'automne, une fois que ces dernières ont été fauchées.





Pour les mères Limousines, les animaux passent l'hiver (novembre à mars) sur la parcelle du futur projet agrivoltaïque. Cette parcelle est plus portante que les autres du quartier et supporte le piétinement des animaux lors des périodes très humides sans trop se dégrader. Lors de la présence des animaux sur cette parcelle, que l'on appelle « parcelle maîtresse », ils sont affouragés en continu, le prélèvement au pâturage est donc secondaire. Une fois la période d'affouragement terminée, les mères pâturent en rotation sur le reste des parcelles du quartier. Les mères peuvent retourner sur la parcelle maîtresse pendant la période estivale s'il est nécessaire d'affourager par manque de ressources pâturables les années de sécheresse, ce qui arrive régulièrement ces dernières années.

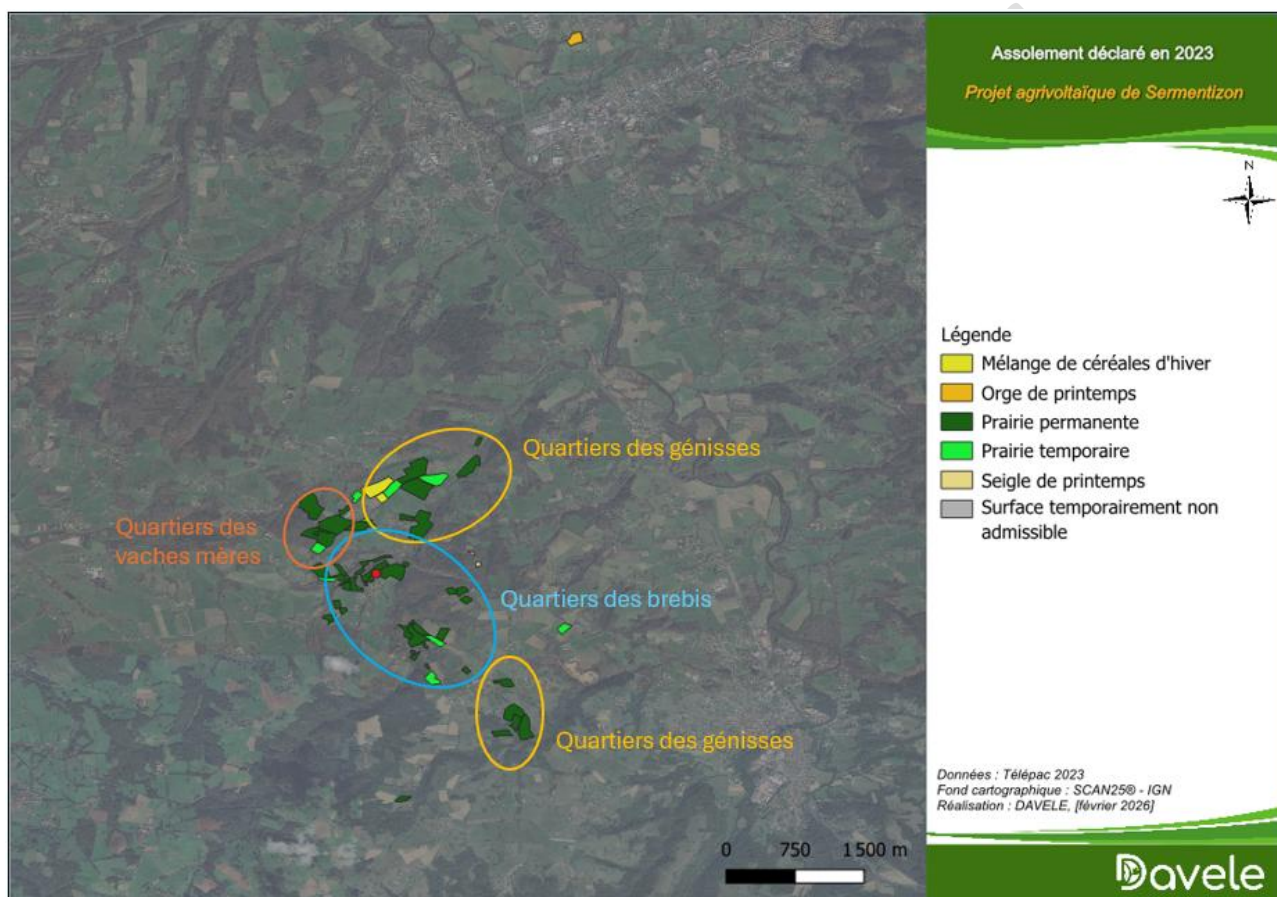


Figure 12 : organisation du pâturage

Afin de conserver une bonne productivité, les exploitants veillent à ne pas trop « descendre » les prairies, c'est-à-dire à ce que les animaux soient sortis avant que l'herbe ne soit trop rasée. Les clôtures des parcs sont majoritairement en barbelés avec quelques buissons mais qui ne garantissent actuellement pas l'étanchéité vis-à-vis des chiens : les exploitants ont régulièrement des problèmes d'attaque par des chiens du voisinage dans le quartier de pâturage des vaches Limousines. Les chiens s'introduisent dans les parcelles, dérangent en courant les troupeaux et peuvent blesser ou tuer les veaux présents.





Tableau 4 : critères théoriques d'organisation du pâturage

| Période de pâturage                     | Surface moyenne des paddocks | Temps de présence moyen par paddock          | Hauteur d'herbe maximale à l'entrée des animaux | Hauteur d'herbe minimale à la sortie des animaux | Temps de repos entre deux passages |
|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| Variable en fonction du type de cheptel | Très variable/adaptable      | Dépendant de la pousse de l'herbe/chargement | 15 à 20 cm                                      | 6 à 7 cm                                         | 21 jours                           |

Les périodes au pâturage des différents lots d'animaux sont synthétisées ci-dessous :

Tableau 5 : calendrier de pâturage

|                           |                              | Janvier                                            | Février | Mars | Avril                                     | Mai | Juin | Juillet                                                             | Août | Septembre                                 | Octobre | Novembre             | Décembre |
|---------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|---------|------|-------------------------------------------|-----|------|---------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------|---------|----------------------|----------|
| Quartier de pâturage bleu | Brebis agnelage d'hiver      |                                                    |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |
|                           | Agneaux d'hiver              |                                                    |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |
|                           | Brebis agnelage de printemps |                                                    |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |
|                           | Agneaux de printemps         |                                                    |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |
| Quartier rouge            | Vaches                       | Parcelle "maîtresse"                               |         |      | Rotation sur autres parcelles du quartier |     |      | Parcelle "maîtresse" si besoin d'affourager, autres parcelles sinon |      | Rotation sur autres parcelles du quartier |         | Parcelle "maîtresse" |          |
|                           |                              | Mise bas, gestation, lutte tout le long de l'année |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |
| Quartier orange           | Génisses                     |                                                    |         |      |                                           |     |      |                                                                     |      |                                           |         |                      |          |

|           |  |             |  |          |  |
|-----------|--|-------------|--|----------|--|
| Pâturage  |  | Stabulation |  | Mise bas |  |
| Gestation |  | Lutte       |  |          |  |

## E. EVALUATION THEORIQUE DE LA CAPACITE D'AFFOURAGEMENT

Le tableau suivant permet de comparer les besoins théoriques en affouragement conservé et totaux des 2 ateliers d'élevage de l'exploitation avec la production de celle-ci. Ceci permet de se rendre compte du niveau d'autonomie théorique de l'exploitation et de sa capacité à maintenir le même effectif sur l'exploitation.

Tableau 6 : besoins annuels en fourrage des troupeaux

|                | Besoins annuels fourrage en T de MS | Dont besoins sur la période d'affouragement (TMS) | Dont besoins à prélever au pâturage (T de MS) | Besoins annuels céréales en T | Production annuelle de fourrage en T de MS | Production de foin annuelle en T de MS | Production de céréales annuelle en T |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Troupeau ovin  | 141                                 | 85                                                | 56                                            | 31                            | 632                                        | 263                                    | 40                                   |
| Troupeau bovin | 265                                 | 140                                               | 125                                           | 4.5                           |                                            |                                        |                                      |
| TOTAL          | 406                                 | 225                                               | 181                                           | 35.5                          |                                            |                                        |                                      |





Nous pouvons voir que la quantité de foin fauchée par an suffit à affourager les deux types de troupeaux toute l'année avec une légère marge qui pourrait permettre un affouragement supplémentaire en cas de manque d'herbe. La quantité de céréales récoltée quant à elle, est légèrement supérieure aux besoins et permet donc l'apport d'aliment énergétique à tous les troupeaux même en cas de légère augmentation du cheptel ou de rendement n-1 plus mauvais.

Lors de la conversion en agriculture biologique il y a 10 ans, les rendements observés par les exploitants ont baissé de façon prévisible. Si 2023 a été une année de récolte exceptionnelle avec plus de 1200 bottes de foin produites, une année de production moyenne se situe davantage autour de 700 bottes. De plus, ces dernières années, suite à l'augmentation des épisodes de sécheresse, les exploitants remarquent des diminutions de rendements entraînant une baisse de la quantité de fourrage récolté. De plus, ces épisodes de sécheresses augmentent également le temps nécessaire d'affouragement des animaux notamment par manque de quantité pâturable pendant la période estivale. Les éleveurs sont donc préoccupés par leur autonomie alimentaire à l'avenir si la dynamique climatique actuelle ne s'infléchit pas. Ils ont souhaité s'agrandir mais la demande étant forte dans la région, les terres disponibles sont allouées en priorité aux jeunes s'installant ou en début d'activité. Pour conserver le même nombre d'animaux, ils devraient améliorer leur production sur leur surface actuelle. Etant en Bio, leurs leviers d'action sont réduits : ils envisagent de récolter les graines des prairies plus productives afin de sur-semer les prairies moins productives avec des semences adaptées à leur exploitation ou encore de tester de nouveaux mélanges d'espèces. Cependant, en comparaison aux moyennes départementales, les niveaux de production à l'hectare sont déjà bons, les marges d'améliorations sont donc faibles. Ils ne peuvent actuellement pas risquer de perdre des récoltes en testant de nouvelles pratiques.

## F. PRODUCTIONS

Les produits bovins de l'exploitation sont vendus en totalité à la coopérative Covidio Bovicoop (filiale de Sicarev). Sont vendus par l'exploitation : des broutards de 11 mois environ à un poids autour de 320kg afin qu'ils soient engraisés en Italie, des génisses finies vendues vers 3 ans et demi pour être abattues à Roanne (42) ainsi que des vaches de réformes. Les génisses sont commercialisées en appellation biologique (AB) tandis que les broutards sont vendus en filière classique par manque de débouchés en AB sur ce type de produits.

Tableau 7 : produits bovins annuels

|                                             | Broutards                    | Génisses finies (AB) | Vaches réformées |
|---------------------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|
| <b>Débouché</b>                             | Coopérative Covidio Bovicoop |                      |                  |
| <b>Nombre d'animaux théorique vendus/an</b> | 11                           | 3                    | 8                |

Les produits issus de l'élevage ovin sont des agneaux Rava croisés Hampshire, des agneaux mâles Rava (la totalité) ainsi qu'une partie des agnelles Rava vendus comme agneaux gras à l'âge de 5-6 mois à la coopérative COPAGNO (filiale de Feder). En dehors des agnelles Rava conservées pour le renouvellement du troupeau, d'autres agnelles sont vendues en tant que reproductrices à des élevages de la région. Enfin, les brebis réformées sont également vendues à COPAGNO.





Tableau 8 : produits ovins

|                                            | Agneaux mâles/femelles<br>Rava | Agnelles Rava<br>reproductrices | Brebis réformées    |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Type de vente                              | Coopérative COPAGNO            | Vendues à des éleveurs          | Coopérative COPAGNO |
| Nombre d'animaux<br>théorique<br>vendus/an | 180                            | A la marge                      | 20                  |

Très occasionnellement, 2 ventes directes par an sont réalisées afin de fournir en colis d'agneaux les habitants des communes alentours. La commercialisation en vente directe a été initiée en sortie de période Covid puisque l'arrêt de l'activité chambres d'hôtes offrait du temps aux exploitants pouvant être investi dans la vente directe. Toutefois, ce circuit n'a pas été conservé longtemps puisque la remontée des cours d'achat de l'agneau ne l'a pas permis.

## G. MATERIELS ET BATIMENTS

Actuellement, l'exploitation possède la totalité du matériel nécessaire à la fauche, la culture et l'épandage de fumier sauf la moissonneuse qui est amenée par le prestataire réalisant les moissons. Le matériel est fonctionnel et entièrement payé.

Matériel en propriété :

- Andaineur
- Faneuse
- Faucheuse
- Round baller
- Plateaux à fourrage
- Charrue
- Remorque
- Déchaumeur
- Semoir
- Combiné de semis

Du côté des bâtiments, l'exploitation a construit un bâtiment d'élevage pour les ovins de 400m<sup>2</sup> il y a une quinzaine d'années afin de rentrer les brebis mettant bas pendant l'hiver. Ils hébergent aussi durant quelques jours les brouillards ou les génisses en fin d'engraissement.

L'exploitation a également fait construire un tunnel de stockage de fourrage de 600 m<sup>2</sup> il y a une dizaine d'années au niveau du quartier de pâturage des mères Limousines. La durée d'utilisation de ce type de structure est d'environ 10 ans et il commence à s'abîmer (déchirures dans la bâche). De plus, la capacité de stockage est légèrement faible au regard des besoins de l'exploitation.

Dans le cadre du projet agrilvoltaïque, un nouveau bâtiment photovoltaïque devrait être construit pour répondre aux besoins de l'exploitation notamment concernant la stabulation des bovins et le stockage du fourrage. En effet, les vêlages ayant lieu toute l'année, les exploitants ont soulevé le besoin de rentrer leurs vaches lors des mises bas. Cette opération ayant pour but de protéger les veaux des fortes chaleurs, d'accéder plus facilement aux mères et leur veau durant la phase d'observation après vêlage etc.





Le bâtiment permettra également de stocker le foin, la paille, les céréales et le matériel de l'exploitation en remplacement du tunnel actuel vieillissant.



Figure 13 : photographies de la bergerie (Davele)

## IV. MISE EN PLACE DU PROJET AGRIVOLTAÏQUE

### A. LES ENJEUX CLIMATIQUES

#### 1. Le bien-être animal

Le bien-être animal repose sur le respect des cinq libertés fondamentales définies par l'OMSA, parmi lesquelles figure l'absence de stress thermique. Ce type de stress survient lorsque l'animal n'est plus capable de réguler efficacement sa température corporelle face à des conditions environnementales extrêmes. Plusieurs facteurs peuvent en être à l'origine, tels que des températures élevées, une ventilation insuffisante, un accès restreint à de l'eau fraîche ou encore une exposition directe au soleil. Le stress thermique peut entraîner de nombreux effets négatifs sur l'animal, notamment une diminution de la prise alimentaire et donc, un ralentissement de la croissance, des troubles de la reproduction ou une altération de la qualité de la viande (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2018).





Pour le projet agrilvotaïque, nous nous intéressons aux bovins qui seront les animaux qui exploiteront la parcelle du projet.

Le nombre de jours chauds au cours d'une année est un indicateur qui dénombre le nombre de jours pour lesquels la température maximale journalière est supérieure à 25°C. Le bovin est très sensible aux conditions chaudes. On considère qu'au-delà de 25°C les bovins peuvent se trouver en situation de stress thermique et souffrir de la chaleur. Selon les prévisions climatiques de l'outil CLIMADIAG, le nombre de jours chauds pour les bovins aux alentours de Sermentizon va augmenter dans les prochaines décennies.

En 2050, il est prévu une augmentation médiane de 21 jours chauds par an de plus qu'en 2010 (de 56 à 77 jours chauds par an).

### Évolution dans le temps de l'indicateur

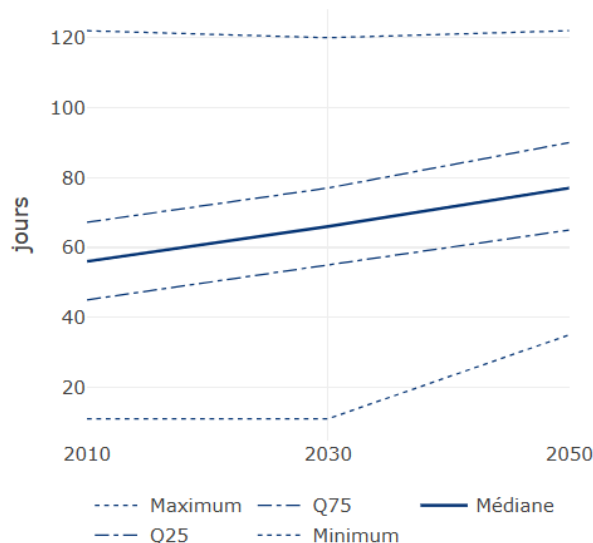


Figure 14 : prévisions du nombre de jours chauds

## 2. La pousse de l'herbe

L'exploitation est essentiellement basée sur un système herbager en autosuffisance pour l'alimentation des ovins et bovins. Il est donc primordial pour les exploitants de conserver leur autonomie.

Pour les principales espèces de prairies tempérées, la photosynthèse ralentit puis s'arrête lorsque la température dépasse certains seuils, qui varient selon les espèces :

- Pour le ray-grass, la photosynthèse s'arrête autour de 25 °C.
- Pour des espèces plus tolérantes comme le dactyle, la fétuque ou la luzerne, ce seuil se situe plutôt autour de 30 °C.
- Le trèfle violet présente un seuil intermédiaire.

Ces températures maximales peuvent être modulées par la disponibilité en eau : si la plante dispose d'eau, elle peut mieux résister à la chaleur grâce à la transpiration. Ainsi, la photosynthèse des espèces de prairies s'arrête généralement entre 25 °C et 30 °C selon l'espèce (Cap Protéines, IDELE).

D'après les projections de CLIMADIAG, le nombre de jours où la température maximale dépasse 30°C autour de Sermentizon devrait continuer à augmenter au fil des années. Alors qu'en 2010, la médiane était de 16 jours par an, elle devrait atteindre 21 jours en 2030 et 28 jours en 2050.

La baisse des précipitations estivales, combinée à des températures plus élevées, a plusieurs impacts négatifs sur les prairies :

- **Réduction de la croissance estivale** : Le stress hydrique limite la croissance des plantes fourragères, entraînant un creux de production en été et une diminution globale du rendement annuel.





- **Moindre résilience des espèces** : Les expériences montrent que les plantes de prairies, en particulier en moyenne montagne, peinent à s'adapter durablement à ces nouvelles conditions, ce qui fragilise la pérennité des prairies.
- **Baisse de la valeur nutritive** : Le manque d'eau et la chaleur peuvent altérer la qualité des fourrages, réduisant leur valeur alimentaire pour le bétail.
- **Risque accru de sécheresse** : Les épisodes de sécheresse seront plus fréquents et plus sévères, aggravant la pression sur la ressource en eau et la productivité des prairies.

### Évolution dans le temps de l'indicateur

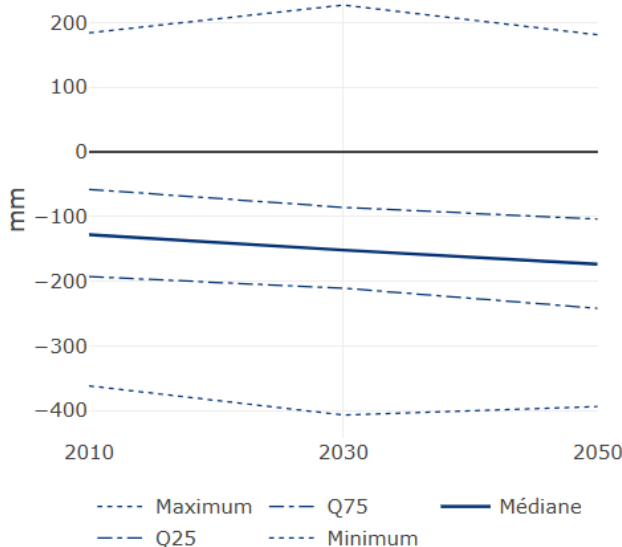


Figure 15 : prévision de l'évolution du bilan hydrique, en mm, à l'horizon 2030 et 2050

Le bilan hydrique, qui correspond à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration, devrait diminuer durant l'été aux alentours de Sermentizon. Il était estimé à  $-128$  mm en 2010, et pourrait passer à  $-152$  mm en 2030, puis à  $-174$  mm en 2050.

Cette évolution traduit une aggravation progressive du stress hydrique subi par les prairies au fil des décennies.

Nous pouvons donc en conclure que l'exploitation sera confrontée, dans les années à venir, à des conditions climatiques peu favorables à la croissance de l'herbe et au bien-être des bovins. Face à cette situation, les exploitants souhaitent adapter leur système d'élevage afin d'assurer la pérennité de leur activité.

## B. PRESENTATION DE LA PARCELLE VISEE PAR LE PROJET

Le projet concerne une zone clôturée de **16,92 ha en incluant la parcelle témoin de 2,1 ha**. L'entité est du projet est une zone témoin dont la conduite sera identique à la partie ouest. Les parcelles sont actuellement des prairies permanentes et temporaires, ne sont pas fauchées et abritent le tunnel à fourrage. Elles sont exclusivement pâturées par les bovins.





Figure 16 : zone d'implantation clôturée



Photographie de la partie basse de la parcelle en mars 2024.





*Photographie de la partie haute de la parcelle en mars 2024*

La parcelle du projet comporte plusieurs zones de bosquets d'arbres et des points d'abreuvement existants.

### C. PRESENTATION DU DESIGN RETENU POUR CE PROJET

Le calepinage ci-dessous est celui retenu par Virya Energy pour ce projet.

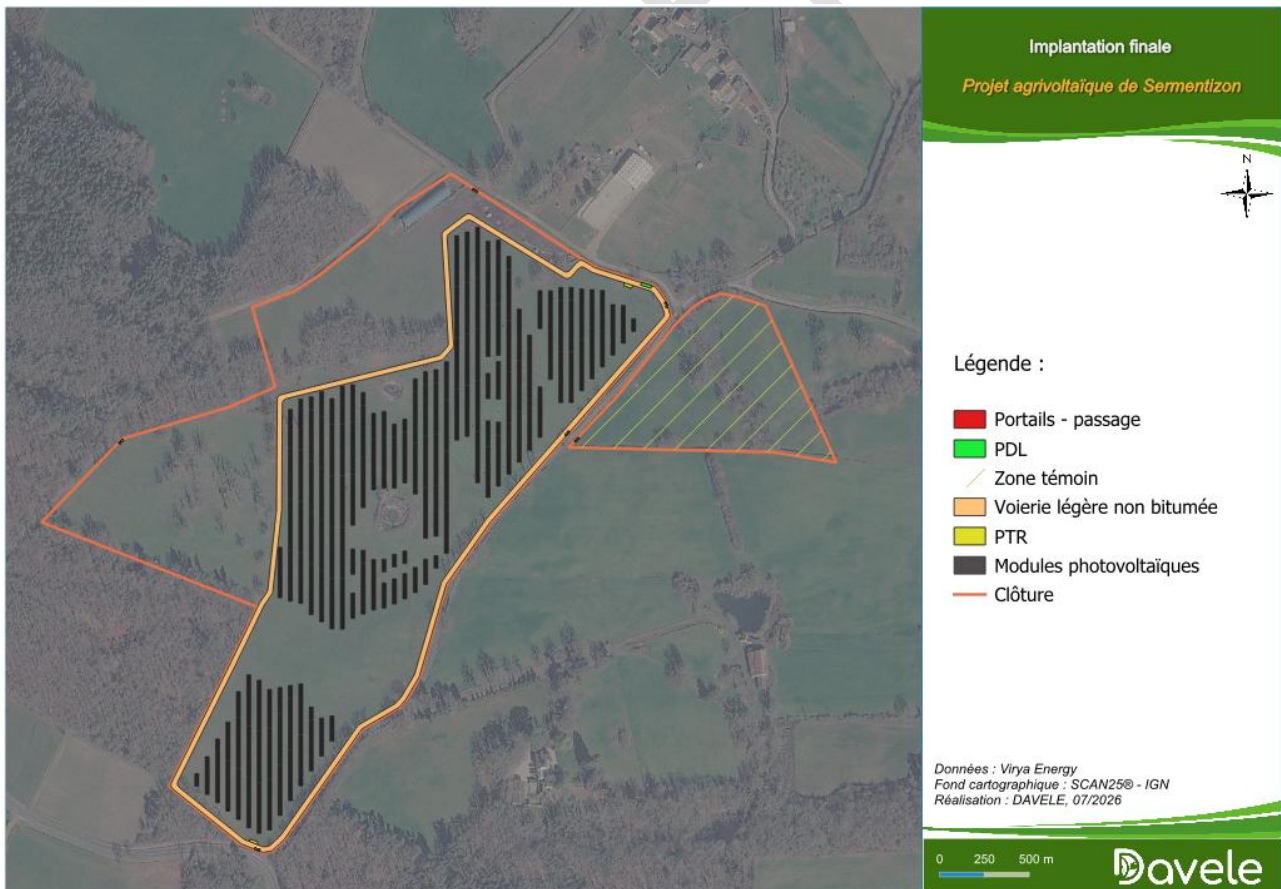


*Figure 17 : projet de centrale agrivoltaïque de Sermentizon*





Afin d'évaluer l'impact de l'ombrage généré par le design retenu, DAVELE utilise un outil de simulation d'ombrage. L'outil de simulation d'ombrage mis au point par DAVELE est basé sur **un modèle mathématique théorique**. Les principes de la trigonométrie permettent la **projection de l'ombrage des panneaux sur un plan**. À cela est ajouté le calcul de la **position du soleil**, permettant le calcul de l'irradiance, pondéré par l'**activité météorologique de l'année** choisie. De ces projections, il est alors possible de savoir où l'ombrage va être impactant. Il est crucial de souligner que même les plantes qui tolèrent l'ombrage ne supportent **pas un taux d'ombrage au-delà de 40 % sans perdre de rendement**. Le taux d'ombrage est la part d'une surface qui reçoit de l'ombre, ce qui est différent de la luminosité (la luminosité fait référence à l'intensité lumineuse dans l'environnement où la plante se trouve). Un taux d'ombrage élevé signifie que la plante reçoit moins de lumière directe, tandis qu'un taux d'ombrage faible signifie qu'elle est plus exposée à la lumière. Le taux d'ombrage peut varier selon l'angle du soleil ou la configuration de l'espace.

Maintenir l'ombrage sous ce seuil garantit des conditions idéales pour la croissance végétale, assurant ainsi la santé et la productivité des cultures tout au long de l'année. Ce point permet notamment à l'éleveur de ne pas être impacté dans son système de production de fourrage et de bénéficier des avantages de l'installation. Le taux d'ombrage situé entre 30-40% a un impact positif sur la pousse de la prairie, avec un allongement de la durée de pousse de la prairie (Zhang et al., 2025).

Néanmoins, il n'a pas été établi dans la littérature de relation stricte entre le niveau d'ombrage et la perte/le gain de rendement : nous ne pouvons pas quantifier, à partir de l'ombrage, la variation de rendement observée à l'échelle d'une parcelle. En dehors de l'apport d'un ombrage, il a été remarqué par exemple dans les zones climatiques à irradiation solaire élevée, une meilleure efficacité hydrique par baisse de l'évapotranspiration et ainsi une augmentation de biomasse sous panneaux (Yavari et al., 2022). La quantité de biomasse produite est issue d'une combinaison complexe de différents facteurs pédo-climatiques.

Le design de centrale retenu par Virya Energy pour la zone d'implantation est le suivant :

- Structure de type Tracker
- Bas de table 2,2 m
- Espacement entre les tables à plat 5,9 m
- Espace pieu à pieu 9,5 m
- Orientation 2V (panneaux en position verticale)
- Inclinaison de 20°

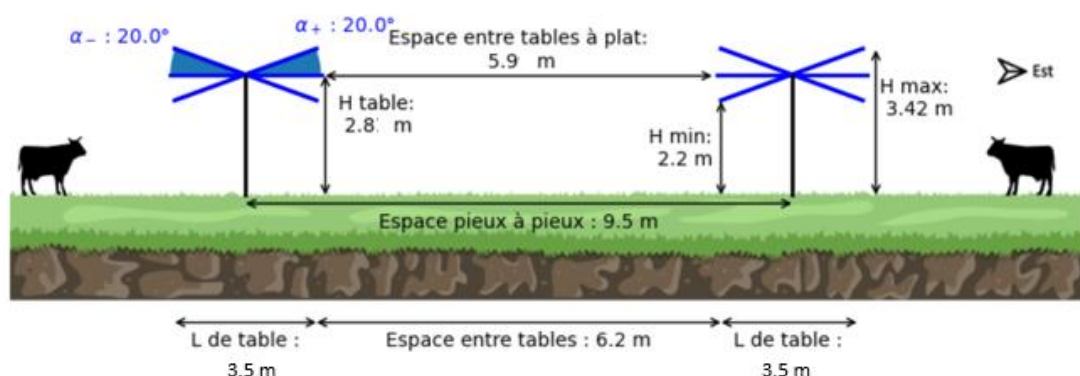


Figure 18 : plan de coupe du design retenu





La hauteur du bas de table à 2,2 m permet **la sécurité des animaux** et facilite le travail de surveillance de l'éleveur en offrant une vision directe sous les panneaux.

L'installation est également **adaptée au travail de l'éleveur** et permet **la mécanisation des parcelles**. Le design a été pensé pour l'exploitation agricole. Même si les exploitants ne souhaitent pas effectuer de fauche sur le site, la configuration permet tout de même l'intervention mécanique (notamment les travaux de fenaison, de broyage...) sur la parcelle agrivoltaïque via le choix de structures en **monopieu**, ainsi qu'un espacement entre les tables de 5,9 m et interpieux de 9,5 m ; un point bas à 2,2 m et un retrait par rapport aux clôtures pour permettre le retournement des tracteurs en bout de rang. Ceci permet de faciliter le travail mécanique sur la parcelle. Ainsi, en cas de reprise de l'exploitation, le futur éleveur aura également le choix de pratique sur la centrale.

Les panneaux sont installés en **configuration verticale** (2V) et de manière non jointive, ce qui favorise une meilleure circulation de l'air et facilite l'écoulement de l'eau entre les modules. Cette disposition limite la stagnation de l'humidité et peut contribuer à préserver la structure du sol. Néanmoins, par nature ces structures peuvent entraîner un écoulement de l'eau de pluie plus irrégulier sous les tables, susceptible de générer localement des zones d'érosion ou de ravinement (Yavari et al., 2022).

La simulation d'ombrage du design retenu, met en évidence un taux moyen d'ombrage égal à 32,06 %, avec des pics atteignant 45 % de taux d'ombrage dans certaines zones. Environ **58 %** de la parcelle se situe dans l'intervalle d'ombrage de 30-40 % dit « **bénéfique** » permettant de rallonger la période de pousse de la prairie, notamment lors de la saison estivale (Semchenko et al., 2012).

On observe qu'environ **13 %** de la parcelle présente un ombrage supérieur à 40 %. Cette proportion, indique que la majorité de la parcelle reste en dessous de ce seuil, ce qui permet à l'éleveur de profiter des avantages liés à l'installation. Plus la surface exposée à un ombrage compris entre 40 et 100 % est limitée, moins l'impact sur la production de fourrage sera significatif.

Les zones bénéficiant d'un ombrage compris entre 0 et 40 % offrent à l'éleveur des conditions favorables pour tirer parti des **bénéfices de l'aménagement**. Environ **87 %** de la parcelle se situe dans cet intervalle.

Il est important de noter que ces pourcentages **ne sont pas cumulatifs**.

Toutefois, cet ombrage peut également offrir un avantage non négligeable lors des épisodes de fortes chaleurs, en procurant aux animaux **un abri contre le soleil** et en réduisant la température de l'air de **2 à 3 degrés** (DAVELE, 2023).



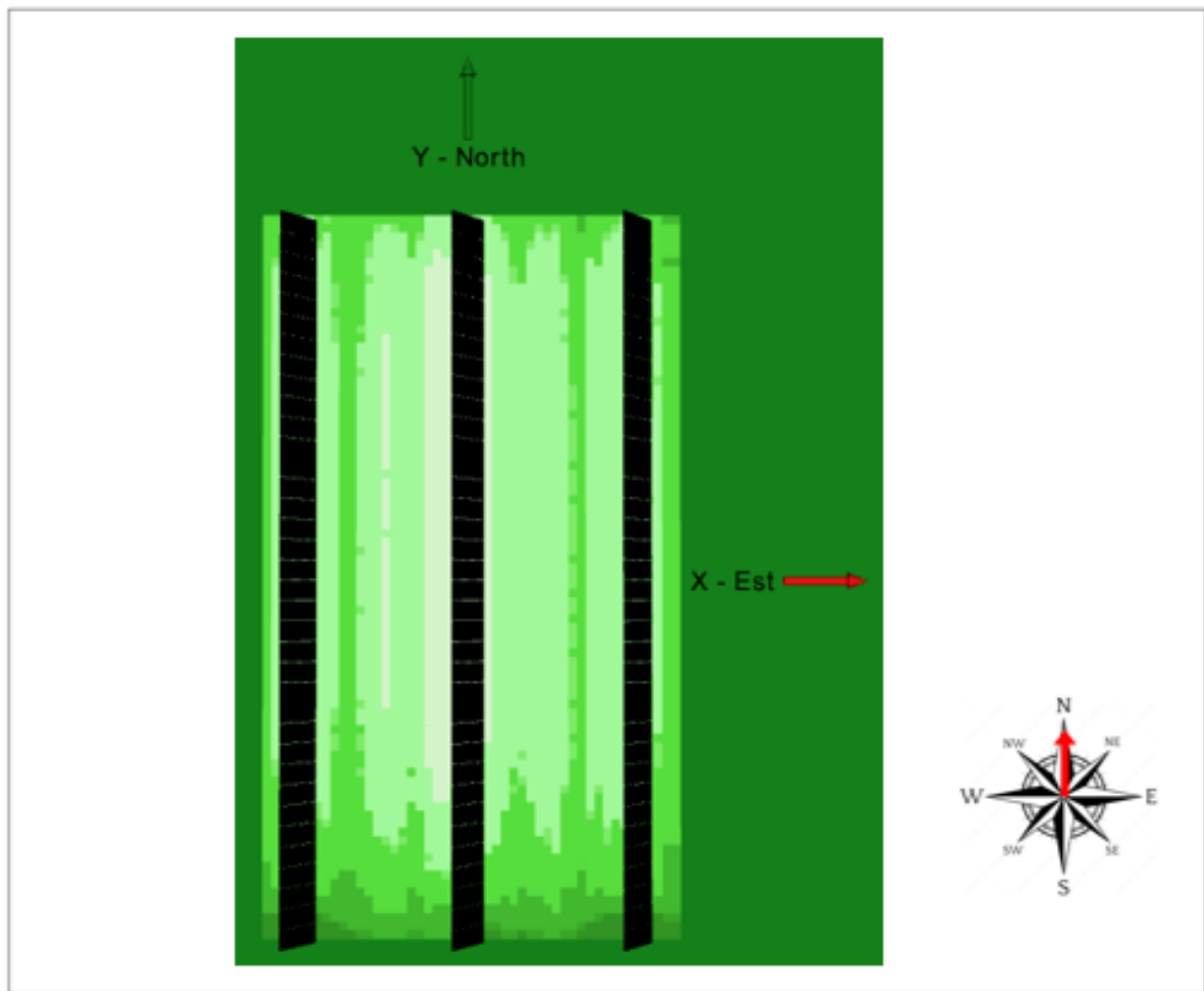


Figure 19 : simulation d'ombrage pour le design retenu

| [0;10%] | [10;20%] | [20;30%] | [30;40%] | [40;50%] | [50;60%] | [60;70%] | [70;80%] | [80;90%] | [90;100%] |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1,47    | 4,80     | 22,75    | 57,97    | 13,01    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         |
| 86,99   |          |          |          | 13,01    |          |          |          |          |           |



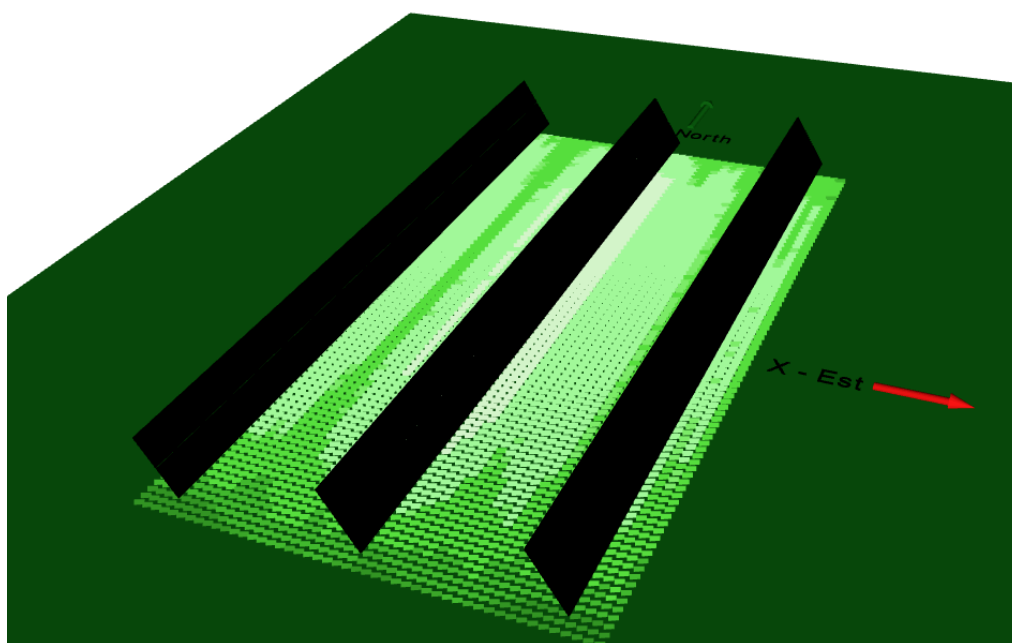


Figure 20 : point de vue en biais de la centrale simulée

#### D. AMENAGEMENTS ET ENTRETIEN

Pour l'entretien de la centrale, nous préconisons à Virya Energy de financer l'achat d'un système de guidage RTK implantable sur le tracteur directement. Celui-ci permet d'assurer le guidage de l'engin avec précision pour une meilleure sécurité des installations photovoltaïques et un travail facilité pour les exploitants. Nous préconisons également d'équiper la structure avec un broyeur déporté intercept favorisant l'élimination au plus près des pieux des adventices. La combinaison de ces deux outils vise à réduire le temps de travail lié à l'entretien de la centrale.

Les points d'abreuvement pourront être disposés aux extrémités des paddocks et devront être accessibles dans un rayon de 200m maximum. Si la distance entre l'abreuvoir et la zone du pâturage des animaux est inférieure à 200m, les animaux vont venir s'abreuver fréquemment, seuls ou en petits groupes. Si la distance est supérieure à 200m, ils viendront boire moins souvent, et en grands groupes. Cela signifie que, si l'abreuvoir est trop petit pour que tous les animaux y accèdent en même temps, ou qu'il n'y a pas assez d'eau pour tout le monde, les dominés ne boiront pas suffisamment, et auront des performances limitées (Alliance Elevage). Pourront être installés des abreuvoirs doubles ou des abreuvoirs à niveau de 400 L, à la convenance des exploitants.

La construction d'une centrale nécessite plusieurs étapes pour adapter le terrain aux structures, assurer la construction des modules, la pose des câbles et des postes de transformation, ainsi que le raccordement au réseau. Ces étapes peuvent impacter fortement les milieux existants, ainsi que le développement ultérieur de la végétation, et donc le potentiel pastoral du site. Le passage d'engins lourds, que ce soit pour le défrichage ou l'installation des structures, peut fortement tasser le sol, ce qui pénalise durablement sa fertilité. Le sol mis à nu par les interventions (enterrement des câbles, par exemple) est à risque accru d'érosion, ce qui altère là aussi son potentiel.





Le risque de pollution du sol par les hydrocarbures est, bien que faible, également non négligeable. Il sera nécessaire d'implanter une nouvelle prairie après les travaux. Afin de maintenir une ressource pastorale tout au long de la vie de la centrale, il faudra appliquer des pratiques permettant de protéger la durabilité de la prairie et du sol. Cette protection passe par une gestion pastorale fine de la part de l'éleveur, mais peut aussi s'appliquer :

- **Par un suivi de la végétation** et de la ressource tout au long de l'exploitation, et la mise en place d'actions correctives en cas de problème.
- **Par une gestion mécanique du site respectueuse** de la prairie. Le broyage des refus, par exemple, ne devrait pas être réalisé trop ras (pas moins de 5 cm) afin de maintenir une couverture végétale du sol suffisante. De même, toute opération de maintenance qui détériorerait le couvert devrait faire l'objet d'un travail de remise en état (sursemis par exemple).

## E. GESTION DU PATURAGE

La parcelle est aujourd'hui exploitée du mois de novembre au mois de mars pour le parcage des vaches et leur affouragement. Elle est également régulièrement utilisée l'été lors des périodes de sécheresse pour affourager en foin le troupeau.

Après projet, les exploitants souhaitent l'utiliser toute l'année afin de bénéficier des avantages de l'installation comme :

- Rallonge de la pousse de l'herbe l'été sous panneau
- Sécuriser les mises bas en plein air
- Bénéficier d'abri contre les aléas climatiques

Celle-ci restera la parcelle maîtresse la plus utilisée de l'exploitation.

Le chargement sera d'environ 25 UGB. Nous préconisons de mettre en place 4 paddocks au sein du projet.

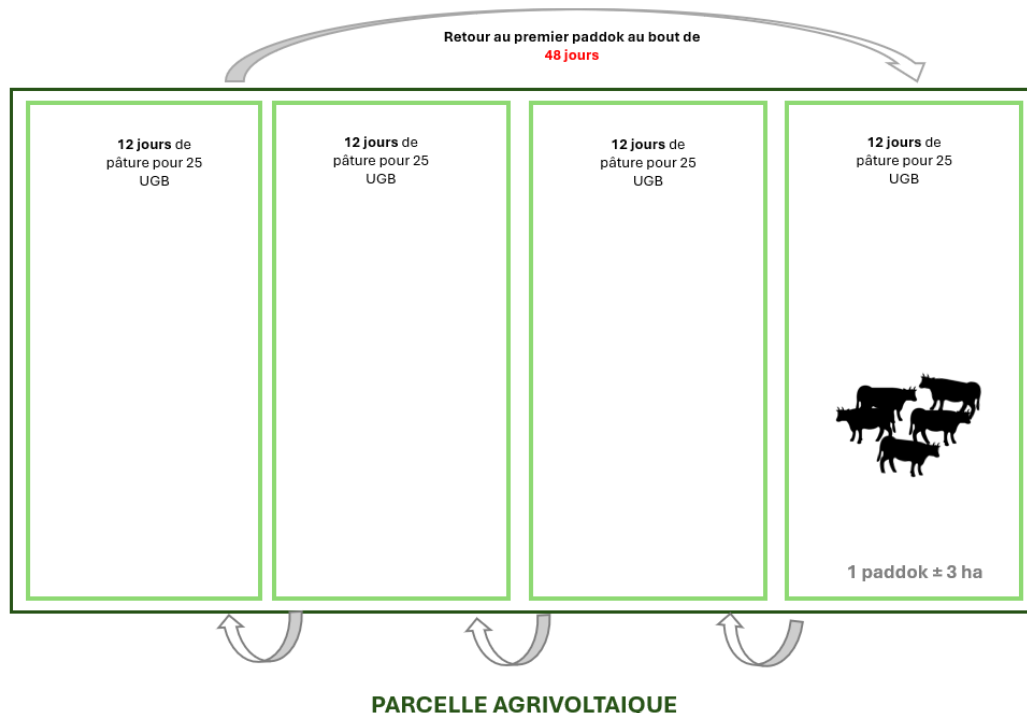


Figure 21 : proposition d'organisation de pâturage





Selon les souhaits des exploitants, cette parcelle sera uniquement pâturée. Le découpage suivant (explicité dans le schéma ci-dessus) est préconisé pour éviter le salissement des parcelles et faciliter le travail des exploitants.

## F. INSTALLATION DE LA PRAIRIE ET PRECONISATIONS DU MELANGE A SEMER

Afin d'assurer une continuité avec l'activité agricole actuelle, la centrale devra être configurée de manière à optimiser son exploitation agricole, voire à apporter des bénéfices à l'élevage. La construction du site photovoltaïque et les interventions mécanisées représentent un impact important pour le sol et la végétation restante. Le passage d'engins lourds, que ce soit pour le défrichage ou l'installation des structures, peut fortement tasser le sol, ce qui pénalise durablement sa fertilité. Le sol mis à nu par les interventions (enterrement des câbles, par exemple) est à risque accru d'érosion, ce qui altère là aussi son potentiel. Le risque de pollution du sol par les hydrocarbures est, bien que faible, également non négligeable. Il sera nécessaire d'implanter une nouvelle prairie après les travaux.

Pour cela, il serait pertinent d'implanter un mélange multi-espèce adapté aux conditions pédoclimatiques du site. Ce mélange d'espèces fourragères pourrait permettre d'installer rapidement une prairie. Nous préconisons pour l'implantation de la future prairie le mélange présenté dans le tableau suivant. Les espèces dominantes dont on attend une forte contribution fourragère sont indiquées en **vert** dans le tableau ci-dessous et les espèces accompagnatrices dont on attend un autre rôle que strictement productif en **orange**.

On notera que le mélange proposé est relativement pérenne. Le sol de la parcelle est séchant, le mélange suivant prend en compte cette spécificité.

Tableau 9 : mélange prairial préconisé

| Espèce                                      | Trèfle blanc (TB)                       | Luzerne (L)                                | Fétuque Elevée (FE)      | Ray Grass Anglais diploïde (RGA)            | Ray Grass Anglais tétraploïde (RGA)         |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Quantité dans le mélange de semences</b> | 3 kg                                    | 4 kg                                       | 13 kg                    | 3 kg                                        | 4 kg                                        |
| <b>Fonctions</b>                            | Production, couvrance du sol, protéines | Légumineuse adaptée aux prairies séchantes | Production               | Supporte un fort chargement, très productif | Supporte un fort chargement, très productif |
| <b>Vitesse d'implantation</b>               | Assez lente                             | Moyenne                                    | Lente                    | Rapide                                      | Rapide                                      |
| <b>Agressivité</b>                          | Agressive                               | Agressive                                  | Assez peu agressive      | Assez agressive                             | Assez agressive                             |
| <b>Besoin de lumière</b>                    | Besoin d'être exposé                    | Fort besoin d'être exposé                  | Besoin d'être exposé     | Besoin d'être exposé                        | Besoin d'être exposé                        |
| <b>Précocité</b>                            | Floraison avant le 15 mai               | /                                          | Epiaison avant le 15 mai | /                                           | /                                           |
| <b>Pérennité</b>                            | > 5 ans                                 | 5 ans                                      | 3-4 ans                  | 2-3 ans                                     | 2-3 ans                                     |





Cependant, les espèces du mélange ont un besoin de luminosité important : l'intérêt d'un suivi expérimental repose sur le fait qu'il peut permettre de faire évoluer le mélange mis en place. Si au cours du suivi expérimental il est observé que les proportions des espèces changent de manière significative, il faudra rééquilibrer le mélange. Les prairies pourront être semées grâce à un semoir DPA, disponible en CUMA.

## V. ECONOMIE DE L'EXPLOITATION

### PRESENTATION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente partie vise à étudier l'évolution de la santé économique et financière de l'exploitation sur les 5 années avant la mise en place du projet puis intègre des simulations de la santé de l'exploitation dans les 5 années suivant la construction de la centrale.

#### A. SITUATION INITIALE

##### 1. Les équilibres économiques générés par l'activité

Les graphiques et tableaux ci-dessous montrent :

- L'évolution de la composition du produit de 2020-2021 à 2024-2025,
- L'évolution de la composition des charges par grands postes,
- L'évolution des produits, des frais et de l'EBE (Excédent Brut d'Exploitation) de l'exploitation pour les années de 2020-2021 à 2024-2025,

Tableau 10 : évolution pluriannuelle du produit

| Evolution pluriannuelle du produit (en €) | 2020-2021      | 2021-2022      | 2022-2023      | 2023-2024      | 2024-2025      |
|-------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Produit ovín                              | 13 609         | 22 314         | 15 350         | 9 439          | 6 134          |
| Produit bovin                             | 48 286         | 54 543         | 30 785         | 30 125         | 47 347         |
| Autres produits                           | 3 376          | 8 603          | 8 996          | 8 438          | 13 312         |
| Aides et indemnités                       | 64 744         | 52 308         | 61 263         | 59 730         | 94 254         |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>130 014</b> | <b>137 767</b> | <b>116 393</b> | <b>107 731</b> | <b>161 048</b> |





Les produits de l'exploitation sont principalement constitués des aides et indemnités sur l'ensemble de la période. Elles représentent chaque année la part la plus importante du chiffre d'affaires, avec un poids particulièrement marqué sur l'exercice 2024-2025 avec un montant total de 94 254 €. L'augmentation des aides sur l'exercice 2024-2025 est liée à une indemnité exceptionnelle de 35 000 €. Le troupeau ovin a été touché par la FCO en 2023, cette prime de 35 000 € correspond à une indemnisation de la mortalité. Si on soustrait ce montant au total des aides, on retrouve bien le montant moyen des aides versées d'environ 60 000 €.

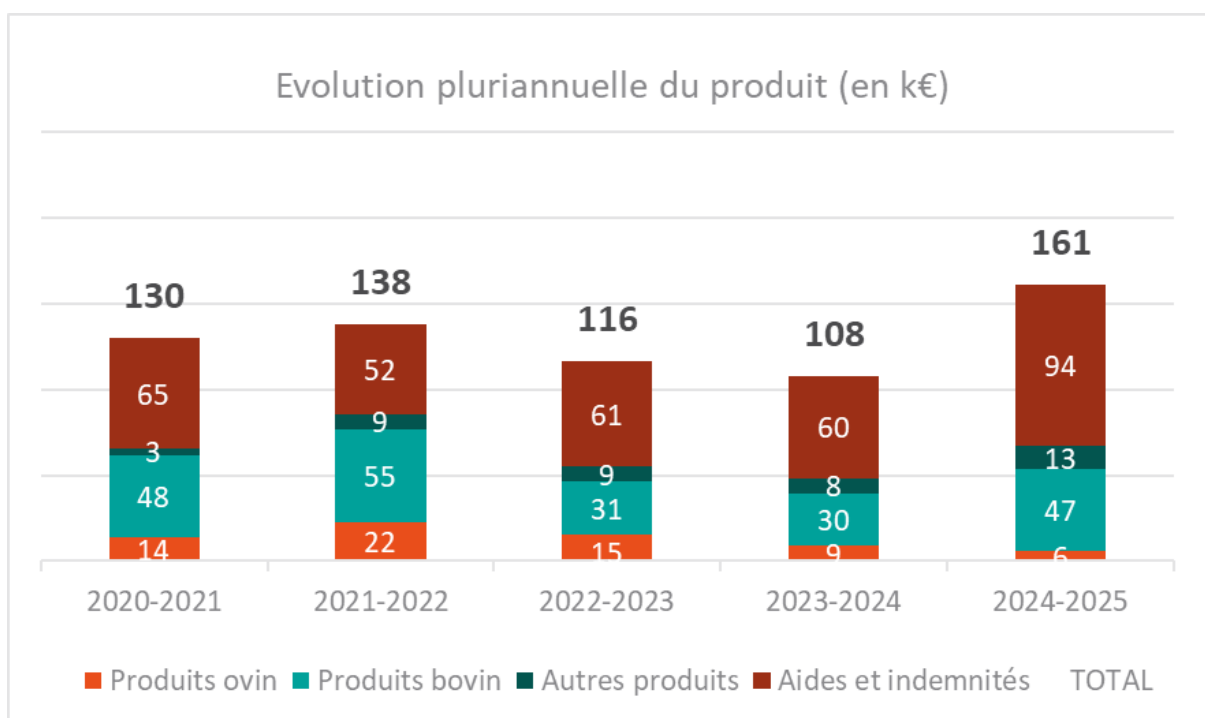


Figure 22 : évolution pluriannuelle du produit

On observe aussi qu'après une légère hausse du produit entre 2020-2021 et 2021-2022 (de 130 014 € à 137 767 €), le produit diminue sur deux exercices consécutifs pour atteindre 107 731 € en 2023-2024. Cette baisse s'explique principalement par le recul des produits bovins et ovins. Les produits ovins diminuent à partir de l'exercice 2023-2024 car l'exploitation a perdu la moitié de son troupeau qui a été touché par la FCO en 2023. En 2025, le troupeau ovin n'avait toujours pas retrouvé sa taille initiale, c'est pourquoi les produits ovins restent faibles. Les produits bovins diminuent à partir de 2022-2023, du fait d'un redimensionnement de cet atelier par les exploitants. Ces produits augmentent ensuite sur l'exercice 2024-2025 conjointement à l'augmentation des cours.

Sur l'exercice 2024-2025, le produit total augmente fortement pour atteindre 161 048 € (+50%), dû à l'indemnité exceptionnelle touchée, mais aussi à l'accroissement des produits bovins, et au développement des balades en calèche (autres produits).

Ainsi, l'exploitation présente une forte dépendance aux aides, ce qui rend le produit global sensible aux variations des dispositifs d'indemnisation.





### Evolution pluriannuelle des frais d'exploitation (en k€)

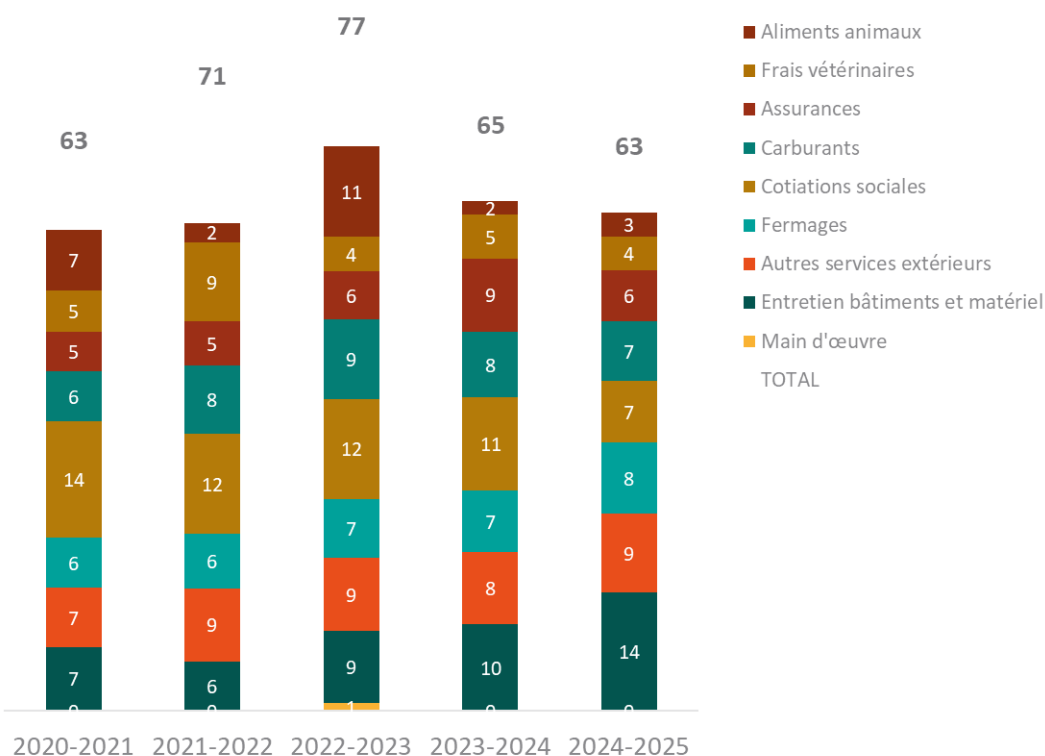


Figure 23 : évolution pluriannuelle des charges

Tableau 11 : évolution pluriannuelle des charges

| Evolution pluriannuelle des charges (en €) | 2020-2021     | 2021-2022     | 2022-2023     | 2023-2024     | 2024-2025     |
|--------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Main d'œuvre                               | 0             | 0             | 852           | 0             | 0             |
| Entretien bâtiments et matériel            | 7 484         | 5 797         | 8 501         | 10 157        | 13 871        |
| Autres services extérieurs                 | 6 933         | 8 587         | 8 602         | 8 420         | 9 227         |
| Fermages                                   | 5 905         | 6 433         | 6 901         | 7 240         | 8 405         |
| Cotisations sociales                       | 13 637        | 11 692        | 11 750        | 10 988        | 7 168         |
| Carburants                                 | 5 897         | 8 042         | 9 386         | 7 709         | 7 039         |
| Assurances                                 | 4 682         | 5 172         | 5 561         | 8 591         | 6 047         |
| Frais vétérinaires                         | 4 761         | 9 291         | 4 117         | 5 109         | 3 897         |
| Aliments animaux                           | 7 130         | 2 264         | 10 583        | 1 661         | 2 887         |
| Travaux par tiers                          | 1 330         | 1 408         | 4 410         | 1 060         | 1 199         |
| Autres achats                              | 1 753         | 4 812         | 497           | 1 317         | 1 108         |
| Impôts et taxes                            | 817           | 826           | 811           | 1 497         | 807           |
| Eau, électricité, gaz                      | 627           | 558           | 448           | 654           | 557           |
| Semences et plants                         | 2 280         | 2 156         | 2 620         | 460           | 554           |
| Achats d'animaux                           | 150           | 3 159         | 450           | 360           | 0             |
| Engrais et amendement                      | 0             | 843           | 1 374         | 0             | 0             |
| <b>TOTAL</b>                               | <b>63 386</b> | <b>71 039</b> | <b>76 861</b> | <b>65 222</b> | <b>62 766</b> |





Les charges totales évoluent de manière irrégulière sur la période. Elles augmentent entre 2020-2021 et 2022-2023, passant de 63 386 € à 76 861 €, avant de diminuer pour atteindre 62 766 € en 2024-2025.

La hausse observée jusqu'en 2022-2023 s'explique principalement par l'augmentation des charges opérationnelles, notamment les aliments animaux, les fermages, le carburant, et l'entretien du matériel. En 2022-2023, les charges d'aliment ont connu un pic important car l'exploitant a dû acheter du fourrage supplémentaire à cause de la sécheresse.

Globalement, les charges de structure restent relativement stables sur les cinq exercices. En revanche, deux rubriques présentent des évolutions marquées. D'une part, l'entretien des bâtiments et du matériel augmente progressivement, passant de 7 484 € en 2020-2021 à 13 871 € en 2024-2025, soit presque un doublement sur la période. D'autre part, les cotisations sociales diminuent fortement passant de 13 637 € à 7 168 €, soit une baisse de près de moitié. Cette évolution est due au résultat d'exploitation, qui a diminué au fil des années, entraînant mécaniquement une baisse des cotisations.

À partir de 2023-2024, les charges diminuent nettement. Cette baisse est liée à la réduction de certaines charges liées à l'activité animale (aliments, frais vétérinaires, achats d'animaux) ainsi qu'à une meilleure maîtrise de certains postes, notamment les achats de semences car l'exploitant utilise maintenant ses semences fermières.

Evolution des produits, frais et EBE (en €)

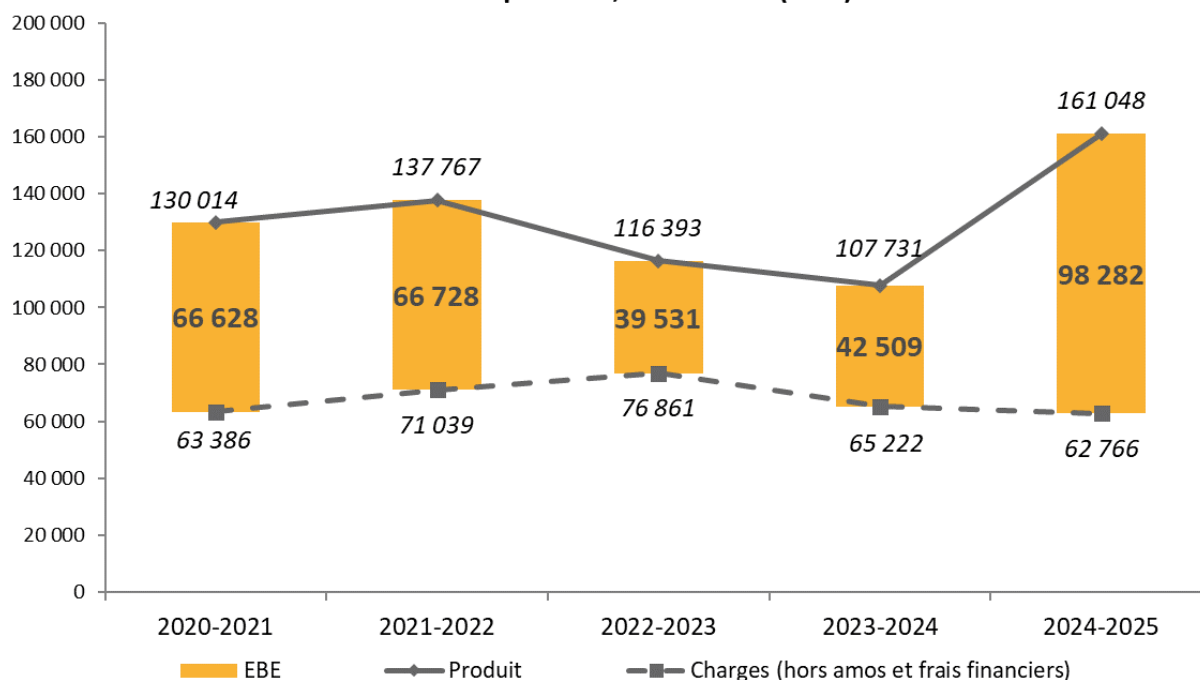


Figure 24 : évolution des produits, frais et EBE

L'analyse de l'EBE sur les 5 exercices met en évidence 3 phases distinctes.

En premier lieu, une stabilité sur les deux premières années, l'EBE reste constant, environ 66 000 €, grâce à une bonne corrélation entre des produits et des charges qui demeurent stables.

En second lieu, un point bas sur l'exercice 2022-2023, avec l'EBE qui chute à 39 531 €, engendré par une légère augmentation des charges et une forte diminution des produits due à la FCO sur le troupeau ovin.





En dernier lieu, après une stabilisation des charges sur les deux derniers exercices, le produit progresse pour atteindre 161 048 € en 2025. Ce pic d'activité, porté par l'encaissement de l'indemnité pour la FCO, permet à l'EBE de s'élever à son niveau maximum sur la période : 98 282 €.

## 2. Les équilibres de trésorerie

L'EBE doit couvrir le remboursement des engagements financiers (annuités d'emprunt + résultat financier court terme), la rémunération des exploitants et les besoins en autofinancement (montant des investissements de l'année – nouveaux emprunts – subventions d'équipement – cessions de matériel).

Sur ce graphique, les prélèvements privés correspondent aux prélèvements effectivement réalisés sur la structure par l'exploitant. Lorsqu'ils sont négatifs, ce sont des apports.

L'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) était suffisant pour couvrir l'intégralité des besoins de l'entreprise, à savoir les annuités et l'autofinancement des investissements.

Evolution des besoins en EBE (en k€)

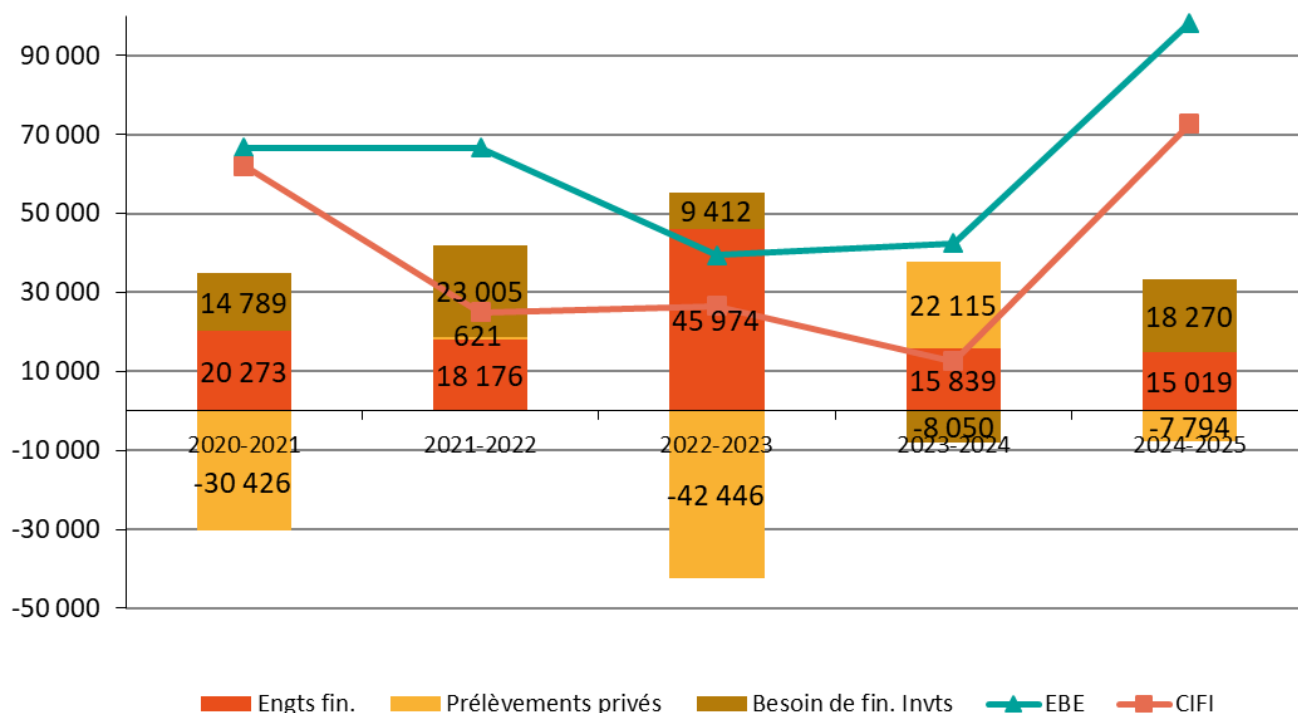


Figure 25 : évolution des besoins en EBE

On note toutefois une exception sur l'exercice 2022-2023. Sur cet exercice, l'EBE ne permet pas de couvrir les engagements financiers en raison d'une hausse ponctuelle des annuités, s'élevant à 45 974 € contre une moyenne habituelle d'environ 17 000 €. Cette variation s'explique par le solde d'un emprunt lié à l'acquisition d'un tracteur, générant un décaissement exceptionnel de 29 000 €. Afin de faire face à cette charge ponctuelle et de préserver l'équilibre de trésorerie, un apport de trésorerie de 42 446 € a été réalisé sur cet exercice.

Plus globalement, l'analyse met en évidence des apports de trésorerie réguliers.





Dans la mesure où l'EBE couvre déjà les besoins et autoriserait des prélèvements privés supérieurs, ces apports constants contribuent directement au maintien d'un niveau élevé de la Capacité d'Investissement et de Financement Interne (CIFI).

### 3. Les équilibres financiers

À la lecture du bilan de l'exercice 2023-2024, on observe que les capitaux propres sont équivalents aux stocks et à l'actif immobilisé. La part de réalisable et disponible correspond aux dettes court terme et long et moyen terme. Ainsi, l'exploitant peut payer l'ensemble de ses dettes de manière autonome, sans avoir recours au financement bancaire.

Sur l'exercice suivant, la structure évolue favorablement puisque la part de réalisable et disponible double et que les emprunts à long et moyen terme diminuent.

#### Bilan par grandes masses (en k€)

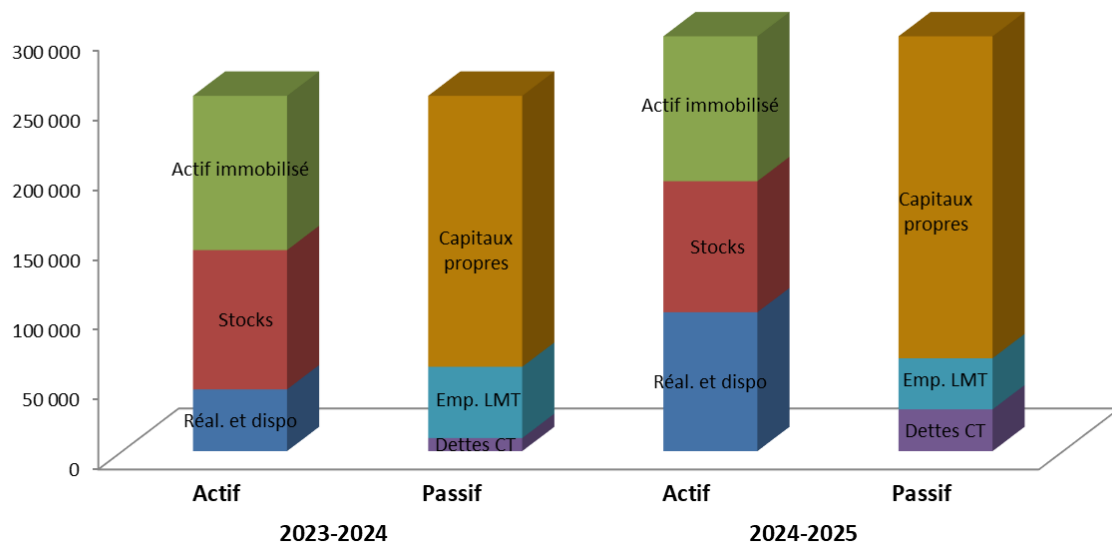


Figure 26 : bilan par grandes masses

Il est à noter que les comptes courants d'associés ont été retraités dans les capitaux propres. Ces derniers étant très élevés, du fait de faibles prélèvements privés, cela engage l'exploitation dans une situation plutôt fragile en cas de départ d'un des associés, car elle sera dans l'obligation de lui régler cette somme. En effet, il se pourrait que l'exploitation n'ait pas la trésorerie pour payer ces montants-là, puisque les comptes courants associés s'élevaient à 151 297 € sur le dernier exercice.

Tableau 12 : analyse du bilan

| Analyse du bilan        | 2023-2024 | 2024-2025 |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Taux d'endettement      | 24%       | 22%       |
| Solvabilité court terme | 4,73      | 3,33      |
| TNG                     | 34 905 €  | 69 603 €  |
| Fond de roulement       | 134 690 € | 163 561 € |





Les équilibres financiers montrent des situations sereines :

- La situation long terme est viable, notamment avec un faible taux d'endettement, bien en dessous du seuil de sérénité, qui est à 40 %, ce qui est favorable pour l'exploitation. Le fonds de roulement est également positif, ce qui signifie que l'exploitation peut assurer son cycle de production, en faisant l'avance des charges opérationnelles.
- La situation à court terme est stable également car la trésorerie nette globale (TNG), qui est la différence entre les créances et disponibilités et les dettes court terme, est largement positive. On retrouve le même état pour la solvabilité court terme, qui est supérieure au seuil de 1.6%.

#### 4. Conclusion intermédiaire

La mesure de la santé économique et financière de l'exploitation est établie à partir d'une combinaison de soldes intermédiaires de gestion comparés à des seuils de référence (voir le détail de la méthode en annexe). L'exploitation peut ainsi être classée dans les catégories Sérénité, Equilibre, Alerte, Critique.

Tableau 13 : évaluation de la santé économique et financière de l'exploitation

| Evaluation de la santé économique et financière de l'exploitation | 2022-2023                                                                                  | 2023-2024                                                                                  | 2024-2025                                                                                    | Seuil sérénité |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Efficacité économique                                             |  34%    |  39%    |  61%    | > 35 %         |
| Revenu disponible /UTHF                                           |  -3 221 |  13 335 |  41 631 | > 20000        |
| Eng. <sup>ts</sup> fin./ EBE                                      |  116%   |  37%    |  15%    | < 35 %         |
| Solvabilité CT                                                    |  4,72   |  4,73   |  3,33   | > 1,6          |
| CIFI / UTHF                                                       |  18 002 |  2 277  |  45 528 | > 5000         |
| Taux d'endettement                                                |  28%    |  24%    |  22%    | < 40 %         |
| Dettes CT / Dettes totales                                        |  12%    |  16%    |  45%    | < 30 %         |
| Encours LMT / EBE                                                 |  1,7    |  1,2    |  0,4    | < 3            |
|                                                                   | Sérénité                                                                                   | Sérénité                                                                                   | Sérénité                                                                                     |                |

La situation économique et financière du **GAEC du Pré Fleuri** apparaît largement sereine, bien que certains indicateurs aient été retraités des comptes courants d'associés. Comme expliqué précédemment, les comptes courants élevés révèlent une certaine fragilité pour l'exploitation qui devra obligatoirement régler cette dette à l'associé qui souhaite sortir de la société.

En effet, certains Soldes Intermédiaires de Gestion (SIG) pouvant apparaître en zone d'équilibre doivent toutefois être relativisés. Ces indicateurs sont influencés par l'absence des comptes courants d'associés, intégrés dans les capitaux propres, ce qui peut dégrader la lecture de certains ratios. La solvabilité court terme, le taux d'endettement, et le rapport des dettes court terme sur les dettes totales, apparaissent comme satisfaisants. Une fois retraitées en ajoutant le montant des comptes courants associés, ces valeurs deviennent alarmantes. De fait, en retraitant les comptes courants d'associés dans les dettes court terme, on obtient un taux d'endettement de 73% sur l'exercice 2024-2025, largement supérieur au seuil de sérénité de 40%, ce qui placerait l'exploitation dans une situation critique sur le remboursement des dettes financières. Pour la Trésorerie Nette Globale (TNG), elle deviendra négative atteignant -81 695 €.





La situation économique du GAEC du Pré Fleuri est sereine. L'EBE généré permet de couvrir les engagements financiers et assure une capacité d'autofinancement cohérente avec les besoins de l'exploitation.

Certains indicateurs financiers peuvent apparaître équilibrés, notamment en matière d'endettement et de trésorerie, mais leur lecture doit être nuancée en raison du poids des comptes courants d'associés intégrés dans les capitaux propres.

A noter que les apports réguliers de trésorerie et l'absence de prélèvements privés ne sont pas une stratégie durable pour la viabilité de l'exploitation.

## B. PREVISIONNEL ECONOMIQUE

### 1. Les paramètres de l'étude

Compte tenu du système actuel et des moyens de production, nous allons prendre en compte une base de projection sur les hypothèses suivantes :

#### *Les produits*

- Produit bovin : Moyenne des 3 dernières années pour correspondre au dimensionnement de l'activité actuelle.
- Produit ovin : Moyenne des exercices 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023, car ce sont les exercices pour lesquels l'activité ovine n'a pas été impactée par la FCO.
- Autres produits : Moyenne des 3 dernières années pour prendre 3 années de contexte différent.
- Aides PAC : Aides n-1 pour prendre les aides les plus récentes, en soustrayant l'aide exceptionnelle touchée en 2024-2025 du calcul.

L'hypothèse ne compte pas d'augmentation des produits liée à l'inflation car il est considéré que les produits sont plus soumis aux fluctuations du marché qu'à l'inflation, car les produits sont calculés à partir d'une moyenne sur plusieurs années.

#### *Les charges*

- Charges opérationnelles liées à l'atelier d'élevage (achat d'aliment, produits vétérinaires, achats liés à l'élevage) : moyenne des 3 dernières années pour prendre en compte les mêmes années que les produits.
- Charges opérationnelles végétales (semences et plants, engrais et amendement) : moyenne des 3 dernières années pour prendre en compte l'évolution instable de ces charges sur les dernières années.
- Foncier : année n-1 pour prendre en compte les derniers fermages.
- Carburants : année n-1, qui reflète un niveau de charge cohérent selon le contexte actuel.
- Travaux par tiers : année n-1 car les charges de travaux par tiers sont stables sur l'ensemble des exercices sauf une année, ce qui permet de lisser cet écart.
- Entretien installation et matériel : moyenne des 3 dernières années pour prendre en compte le côté aléatoire des réparations de matériel.
- Cotisations sociales : moyenne des 3 dernières années pour lisser la fluctuation sur les différents exercices.
- Autres charges de structure (assurances, impôts, taxes, eau, électricité) : année n-1.





De même que pour les produits, la prévision ne compte pas d'augmentation liée à l'inflation pour les charges opérationnelles car il est considéré qu'elles dépendent plus des fluctuations du marché que de l'inflation. Le marché est pris en compte car les charges sont calculées à partir d'une moyenne sur plusieurs années.

Les charges de structure ne sont pas indexées sur l'inflation non plus pour rester cohérent avec les produits et les charges opérationnelles.

*Les modifications liées à la mise en place des panneaux*

Indemnisation du fermier : non prise en compte dans l'étude,

*Plan d'investissement*

- Montant des annuités : Simulation de l'échéancier des emprunts actuels sur 6 ans.
- Sur les 4 dernières années, l'exploitant a investi 48 000 €, soit en moyenne 12 000 € par an pour du renouvellement de matériel, financé par emprunt. Ainsi, l'étude compte un nouvel emprunt de 12 000 € par an, à 3.5 % sur 7 ans, sur toute la durée de la simulation.

## 2. Projection des produits

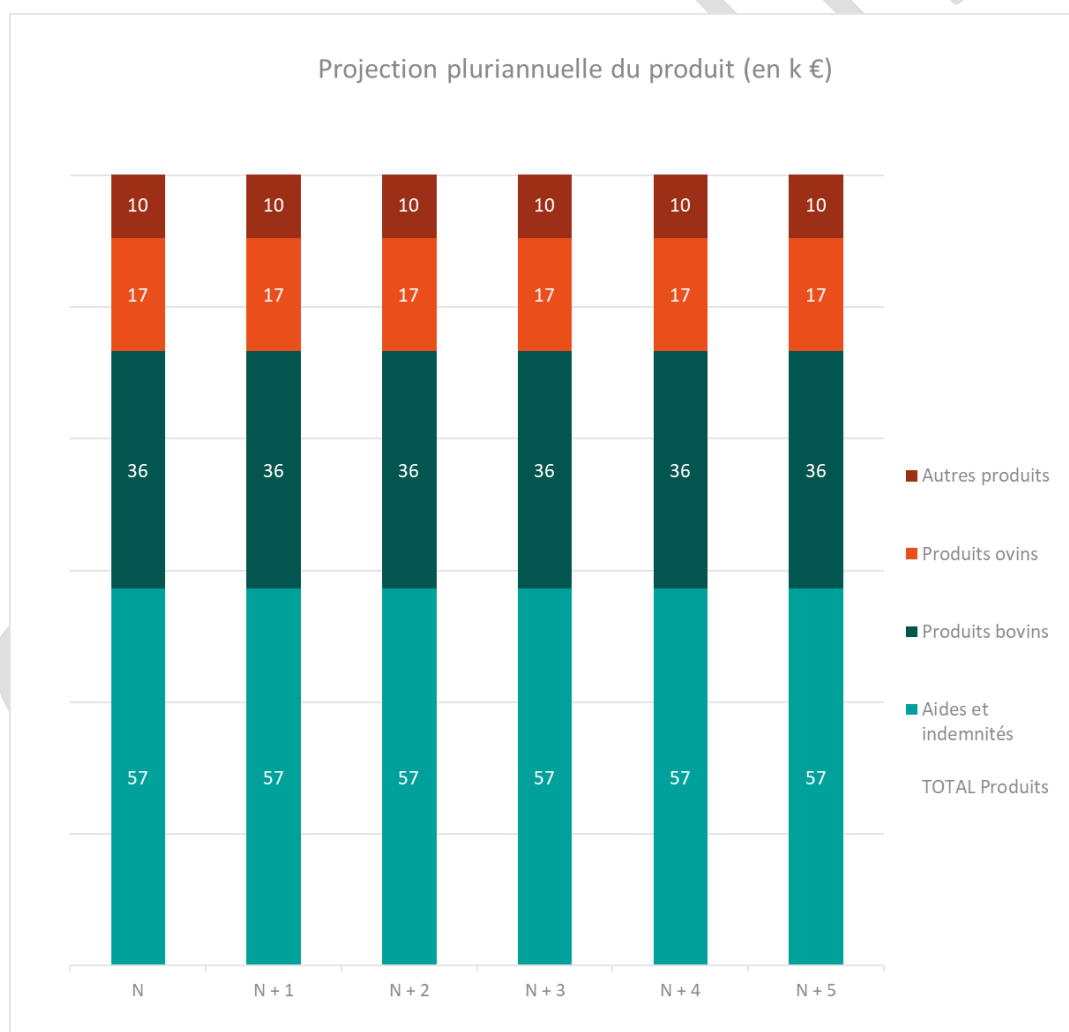


Figure 27 : projection du produit





Tableau 14 : projection pluriannuelle du produit

| Projection pluriannuelle du produit (en k €) | N              | N + 1          | N + 2          | N + 3          | N + 4          | N + 5          |
|----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Aides et indemnités                          | 57 228         | 57 228         | 57 228         | 57 228         | 57 228         | 57 228         |
| Produits bovins                              | 36 085         | 36 085         | 36 085         | 36 085         | 36 085         | 36 085         |
| Produits ovins                               | 17 091         | 17 091         | 17 091         | 17 091         | 17 091         | 17 091         |
| Autres produits                              | 10 249         | 10 249         | 10 249         | 10 249         | 10 249         | 10 249         |
| <b>TOTAL Produits</b>                        | <b>120 653</b> | <b>120 653</b> | <b>120 653</b> | <b>120 653</b> | <b>120 653</b> | <b>120 653</b> |

Dans les conditions de la simulation, le produit se compose principalement des aides de la PAC et des produits bovins, complétés par le produit ovin et les balades en calèches (autres produits).

### Projection des charges

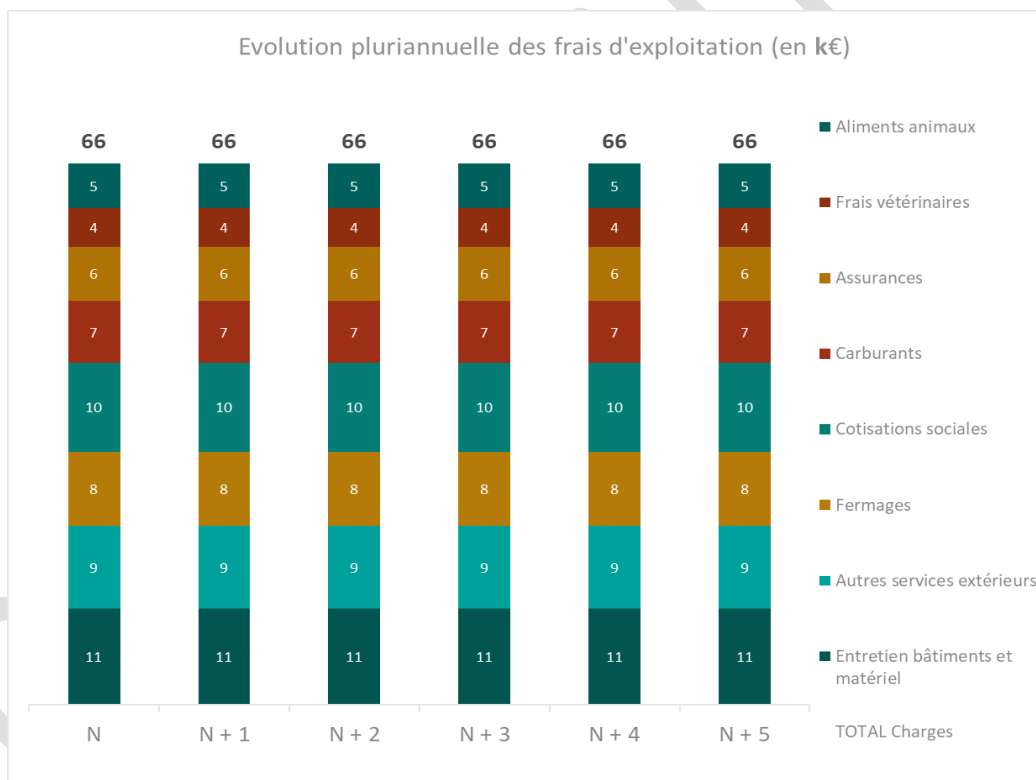


Figure 28 : évolution des charges

Le total des charges reste le même sur les 6 exercices à venir car aucune d'entre elles n'est indexée par l'inflation pour rester cohérent sur le calcul des produits. Les postes de charges les plus importants sont l'entretien des bâtiments et du matériel, les autres services extérieurs, les cotisations sociales, et les fermages.





Tableau 14 : évolution des charges

| Evolution pluriannuelle des charges (en €) | N             | N + 1         | N + 2         | N + 3         | N + 4         | N + 5         |
|--------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Main d'œuvre                               | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| Entretien bâtiments et matériel            | 10 843        | 10 843        | 10 843        | 10 843        | 10 843        | 10 843        |
| Autres services extérieurs                 | 9 227         | 9 227         | 9 227         | 9 227         | 9 227         | 9 227         |
| Fermages                                   | 8 405         | 8 405         | 8 405         | 8 405         | 8 405         | 8 405         |
| Cotisations sociales                       | 9 969         | 9 969         | 9 969         | 9 969         | 9 969         | 9 969         |
| Carburants                                 | 7 039         | 7 039         | 7 039         | 7 039         | 7 039         | 7 039         |
| Assurances                                 | 6 047         | 6 047         | 6 047         | 6 047         | 6 047         | 6 047         |
| Frais vétérinaires                         | 4 374         | 4 374         | 4 374         | 4 374         | 4 374         | 4 374         |
| Aliments animaux                           | 5 043         | 5 043         | 5 043         | 5 043         | 5 043         | 5 043         |
| Travaux par tiers                          | 1 199         | 1 199         | 1 199         | 1 199         | 1 199         | 1 199         |
| Autres achats                              | 974           | 974           | 974           | 974           | 974           | 974           |
| Impôts et taxes                            | 807           | 807           | 807           | 807           | 807           | 807           |
| Eau, électricité, gaz                      | 557           | 557           | 557           | 557           | 557           | 557           |
| Semences et plants                         | 1 211         | 1 211         | 1 211         | 1 211         | 1 211         | 1 211         |
| Achats d'animaux                           | 270           | 270           | 270           | 270           | 270           | 270           |
| Engrais et amendements                     | 458           | 458           | 458           | 458           | 458           | 458           |
| <b>TOTAL Charges</b>                       | <b>66 424</b> | <b>66 424</b> | <b>66 424</b> | <b>66 424</b> | <b>66 424</b> | <b>66 424</b> |

## Projection de l'EBE

Le graphique reprend les principales évolutions de la simulation.

### Evolution des produits, frais et EBE (en €)

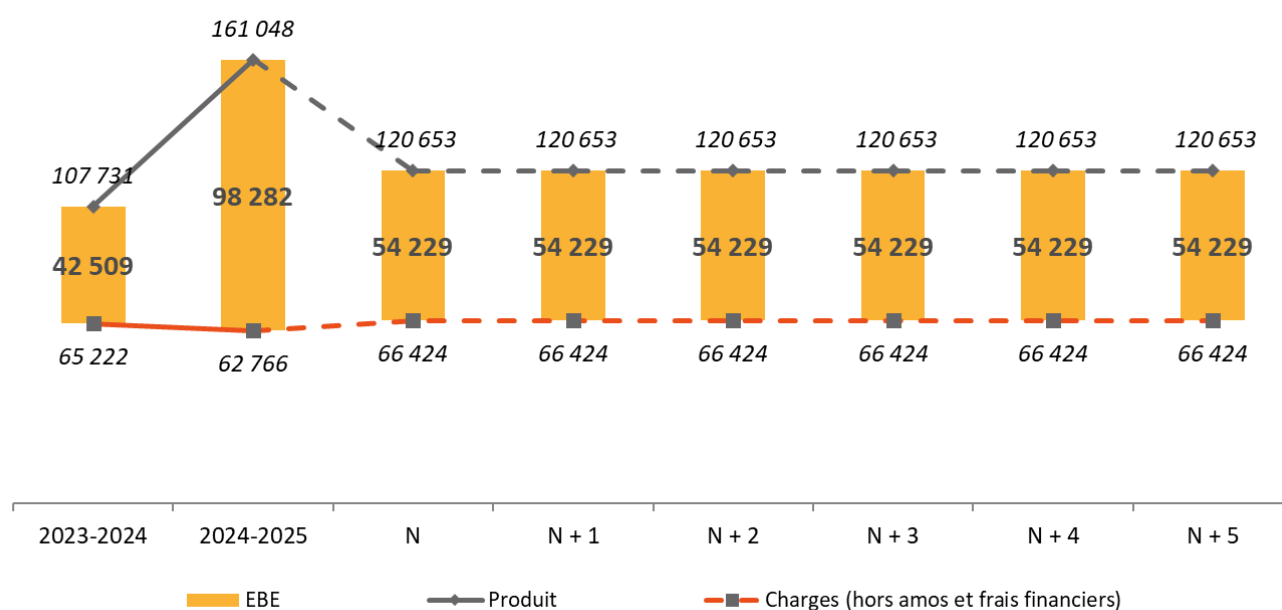


Figure 29 : évolution des produits, frais et EBE





L'EBE prévisionnel serait de 54 229 €, ce qui est cohérent avec l'historique de l'EBE : 47 765 € sur la moyenne des 3 derniers exercices, retraitée de l'aide exceptionnelle de la FCO, touchée sur l'exercice 2024-2025.

Le rapport EBE/produits, qui mesure la rentabilité de l'exploitation, atteint les 45%. Cet indicateur est supérieur au seuil de sérénité, basé à 30%, ce qui est cohérent et plutôt bon dans un système d'élevage.

### 3. Projection de l'EBE

#### Utilisation de l'EBE

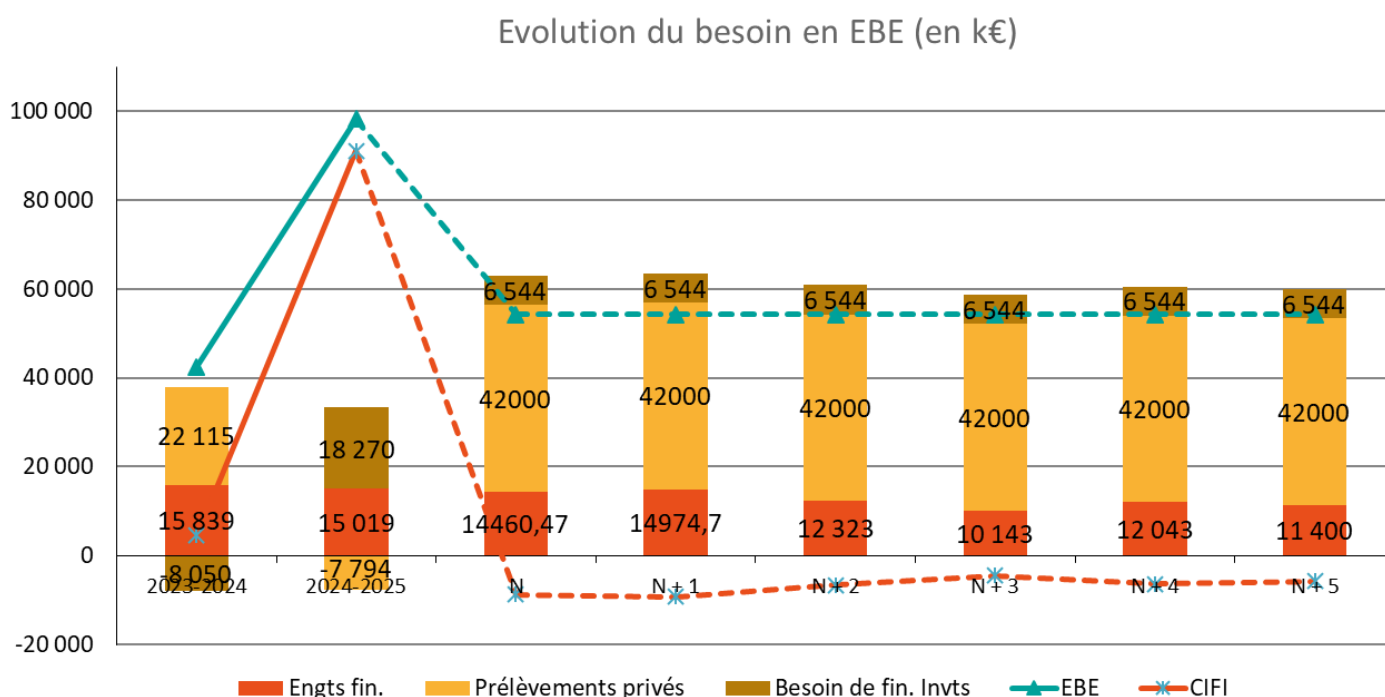


Figure 30 : évolution du besoin en EBE

Les prélèvements privés sont habituellement calculés sur la moyenne des 3 dernières années. Ici, la moyenne serait négative en raison des apports de trésorerie supérieurs aux prélèvements. Pour avoir un calcul sur le prévisionnel le plus objectif possible, nous avons décidé de baser les prélèvements privés sur la rémunération brute minimale passée en comptabilité pour un GAEC, à savoir 21 000 € par an et par associé. En revanche, en pratique, on constate que les prélèvements ne sont pas réguliers et n'atteignent jamais ce montant-là.

Le besoin de financement des investissements est calculé sur la moyenne des 3 derniers exercices.

On constate sur la simulation que l'EBE ne couvrirait pas la totalité des besoins. Ainsi, il entrainerait donc une Capacité Interne de Financement des Investissements (CIFI) négative, donc l'exploitation ne disposerait pas de trésorerie pour avoir une marge de sécurité, rembourser ses dettes court terme ou financer de nouveaux investissements.





## C. NOTION DE REVENU DURABLE

L'article L. 314-36 du Code de l'énergie, introduit par la loi du 10 mars 2023 d'accélération de la production d'énergies renouvelables (APER), prévoit que répondent à la définition d'installations agrivoltaïques celles qui garantissent un **revenu durable** aux agriculteurs. Le décret du 8 avril donne une définition de cette notion de revenu durable comme suit :

« Le revenu issu de la production agricole est considéré comme durable lorsque la moyenne des revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole après l'implantation de l'installation agrivoltaïque n'est pas inférieure à la moyenne des revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole avant l'implantation de l'installation agrivoltaïque, en tenant compte de l'évolution de la situation économique générale et de l'exploitation, selon des modalités définies par arrêté. Une diminution plus importante peut être acceptée par le préfet du département, en raison d'événements imprévisibles et sur demande dûment justifiée. Dans le cas de l'installation d'un nouvel agriculteur, le revenu est considéré comme durable par comparaison avec les résultats observés pour d'autres exploitations du même type localement. » (R. 314-117 Code de l'énergie).

Dans le cas de l'exploitation du GAEC du Pré Fleuri, le revenu durable avant-projet correspond à la moyenne olympique de l'EBE de 2020-2021 à 2024-2025, c'est-à-dire la moyenne des EBE 2020-2021 (66 629 €), 2021-2022 (66 728 €) et 2023-2024 (42 0509 €). Les EBE 2022-2023 et 2024-2025, respectivement l'EBE le plus faible (39 531 € en 2022-2023) et le plus élevé (98 282 € en 2024-2025) sont exclus de cette moyenne.

Ainsi le revenu avant-projet est de **58 622 €**.

Le revenu après projet correspond à la moyenne des EBE des 5 années prévisionnelles après construction de la centrale, soit **54 229 €**.

Les EBE avant et après projet restent **équivalents** et présentent une simulation sereine pour l'avenir. Nous pouvons donc considérer que **le revenu est durable**.

## D. CONCLUSION DE L'ETUDE ECONOMIQUE PREVISIONNELLE

Le résultat de la simulation montre un maintien de la situation économique et financière de l'exploitation du GAEC du Pré Fleuri par rapport à la situation actuelle.

La situation actuelle de l'exploitation, analysée dans l'état initial, met en évidence **une excellente efficacité économique**. L'EBE dégagé par l'activité permet globalement de couvrir les engagements financiers. Malgré cela, le bilan financier est fragile, avec un niveau d'endettement élevé et une trésorerie nette globale négative, mais cela doit être nuancé en raison du poids des comptes courants d'associés intégrés dans les dettes court terme.

Les hypothèses de la simulation s'inscrivent dans la continuité du fonctionnement actuel, sans modification du système d'exploitation. Ainsi, la situation projetée **reste proche de la situation initiale**. L'EBE prévisionnel est cohérent avec l'EBE historique, mais il ne permettrait pas de couvrir l'ensemble des besoins théoriques (annuités, prélèvements privés à hauteur de la rémunération comptable, et autofinancements). La Capacité Interne de Financement des Investissements (CIFI) serait négative, ce qui ne permettrait pas de dégager de marge de sécurité en trésorerie.

À moyen terme, si on ne constate pas d'amélioration de l'EBE ou de réduction des engagements financiers, la trésorerie pourrait continuer à se dégrader. Ainsi, le projet agrivoltaïque, dans les hypothèses retenues et sans prise en compte d'indemnisation complémentaire, ne modifie pas significativement la trajectoire économique de l'exploitation. La situation reste viable.





## CONCLUSION SUR LE PROJET : REPONSES AUX ATTENTES DE L'AGRIVOLTAÏSME

Le site du projet situé à Sermentizon pour le projet agrivoltaïque compte actuellement 16,92 ha clôturés en incluant la zone témoin de 2,1 ha.

Concernant le design retenu par Virya Energy pour ce projet, le choix du monopieu et les distances inter pieux retenues facilitent la mécanisation du site et le broyage des refus sous les tables. Le troupeau pourra bénéficier des avantages de la centrale comme en tant qu'abri en cas d'intempéries et de stress thermique. La hauteur du bas de table lors des périodes de pâture est suffisante pour permettre à l'éleveur une surveillance normale de son troupeau sans se baisser. Elle est également assez importante pour permettre la sécurité du troupeau bovin. L'espacement prévu entre les colonnes de tables à plat et pieux à pieux permet le passage aisé d'un tracteur pour la mécanisation.

La mise en place du site agrivoltaïque s'accompagne d'un engagement de Virya Energy à restaurer intégralement la parcelle après les travaux de construction et de démantèlement, garantissant ainsi la préservation du terrain. Une partie du site, soit 13 %, devrait subir un ombrage de plus de 40 %, créant des conditions plutôt défavorables qui influenceront la croissance de l'herbe, tandis que 58 % des surfaces profiteront d'un ombrage modéré (entre 30 et 40 %), reconnu pour ses effets bénéfiques sur la végétation. La productivité de la prairie dépendra de plusieurs facteurs, notamment l'état du sol, la végétation, la qualité des travaux réalisés, la gestion du pâturage ainsi que la mise en place d'un semis adapté pour maintenir une couverture végétale optimale. Globalement, l'impact de la centrale sur la production agricole restera maîtrisé. Par ailleurs, dans un contexte de changement climatique, l'ombrage généré par les panneaux photovoltaïques offrira un environnement plus confortable pour le troupeau et la prairie, contribuant ainsi à améliorer le bien-être animal.

La simulation met en évidence la solidité du modèle économique du GAEC du Pré Fleuri, qui maintient une performance stable et cohérente avec la situation actuelle. L'exploitation démontre une bonne efficacité économique et une capacité à honorer ses engagements financiers, malgré un endettement encore conséquent. Les perspectives confirment la viabilité du système et sa résilience à moyen terme. Le projet agrivoltaïque s'inscrit dans cette continuité, sans altérer l'équilibre financier existant, et offre un potentiel de consolidation et de sécurisation de la situation à travers une meilleure valorisation future des ressources.

Le design de la centrale permet un maintien des activités agricoles initiales de l'exploitation et peut être défini comme étant **agrivoltaïque**.





|                                 | Avis du bureau d'étude                                                                                                                                | Justification                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Concernant la partie végétale   | <p>Peu d'atteinte sur le rendement de la prairie pendant la pousse de l'herbe</p> <p>Amélioration du rendement pendant les périodes de sécheresse</p> | <p>Possibilité d'atteinte limitée au rendement due à l'ombrage trop important sur 13 % de la superficie du site.</p> <p>Orientation des panneaux créant des ravines (salissement de la parcelle).</p> <p>Diminution de l'impact des épisodes de sécheresse et d'augmentation du rendement sur 58 % de la surface.</p> |
| Concernant la partie animale    | <p>Amélioration du bien-être animal</p>                                                                                                               | <p>Panneaux permettant la protection du troupeau contre les épisodes climatiques (chaleur, précipitations)</p> <p>Hauteur du bas de table pendant la pâture permettant une visibilité sur toute la parcelle et la sécurité des animaux</p>                                                                            |
| Concernant la partie économique | <p>Avec le projet solaire, l'exploitation est durable</p>                                                                                             | <p>Le projet solaire permet de pérenniser l'exploitation. Le revenu agricole est durable.</p>                                                                                                                                                                                                                         |

CONFIDENTIEL





## ANNEXES

### DEFINITIONS

- L'Excédent Brut d'Exploitation (EBE) mesure le potentiel de ressource dégagée par l'entreprise à l'issue de son cycle d'exploitation, c'est-à-dire l'équilibre entre la production et les moyens courants engagés pour cela. Il est lié à l'activité courante de l'exploitation et indépendant des décisions d'investissement ou de financement de l'entreprise et permet d'évaluer la réussite technique et/ou commerciale de l'entreprise.
- La trésorerie nette globale (TNG) est un indicateur de santé financière de l'exploitation car elle mesure la somme d'argent mobilisable à court terme, notamment en cas de besoin. Une variation de TNG positive correspond à une trésorerie qui augmente donc l'exploitation constitue des réserves de liquidités. Une variation de TNG négative peut s'expliquer par des investissements ou par le remboursement d'une tranche de dette exceptionnellement élevée. Mais si la TNG diminue trop fortement, le risque d'un manque de liquidités augmente.
- L'efficacité économique (EBE/produits) traduit la relation entre les produits et les charges nécessaires. Par exemple, une efficacité économique de 30 % signifie qu'une production vendue 100 € laisse 30 € pour l'exploitation donc nécessite 70 € de charges.
- Le revenu disponible par UTHF (Unité de travail humain Familial) permet de vérifier que les associés peuvent se rémunérer.
- Le ratio engagements financiers (c'est-à-dire les emprunts à moyen et long terme) / EBE représente la part d'EBE qui sera utilisée pour payer les annuités d'emprunts.
- La solvabilité à court terme, représente la capacité à payer les dettes court terme.
- La Capacité Interne de Financement des Investissements (CIFI) représente la différence entre l'EBE et les annuités d'emprunts et prélèvements privés. Elle doit être supérieure à 5000 par UTHF pour que l'EBE couvre les annuités et puisse permettre à l'exploitante de vivre de son travail.
- Le taux d'endettement représente la quantité de dettes par rapport à la valeur de l'exploitation. Il doit être inférieur à 40 %.
- Le ratio dettes courte terme / dettes totales doit être inférieur à 30 %.
- Le ratio encours long et moyen terme (LMT) / EBE représente la capacité de l'EBE à couvrir les emprunts LMT.

#### La méthode et l'analyse du tableau de santé économique et financière de l'exploitation :

La santé économique et financière se mesure via des indicateurs de rentabilité économique, des indicateurs de la situation de trésorerie et des indicateurs de la situation financière. Ils sont comparés sur plusieurs années d'exercice à des seuils de référence.

Pour chaque critère, 4 catégories de points sont possibles en fonction de la valeur du critère. La note finale est calculée en faisant la somme des points pondérée selon certains critères. Elle permet de placer la situation dans 4 catégories :

- Catégorie *sérénité* : l'exploitation est pérenne dans le temps, la situation financière de l'exploitation et les besoins des associés sont couverts,
- Catégorie *équilibre* : l'analyse de la situation nécessite d'être approfondie pour identifier les critères d'attention,
- Catégorie *alerte* : Plusieurs points d'attention impactent la situation économique, financière ou de trésorerie. Il est nécessaire de creuser pour identifier si la situation est liée à la conjoncture ou à la situation interne de l'exploitation, notamment au niveau technique ou des investissements.





- Catégorie *critique* : L'exploitation présente de grandes difficultés économiques, financières et/ou de trésorerie. Il est nécessaire de voir si une procédure de sauvegarde ou de redressement judiciaire pourrait être adaptée.

CONFIDENTIEL





## RÉFÉRENCES

- Abidin, M.A.Z., Mahyuddin, M.N. & Zainuri, M.A.A.M. (2023). Optimal Efficient Energy Production by PV Module Tilt-Orientation Prediction Without Compromising Crop-Light Demands in Agrivoltaic Systems. *IEEE Access*, 11, 71557-71572. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3293850>
- Adeh, E.H., Selker, J.S. & Higgins, C.W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13 (11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Ali Abaker Omer, A., Liu, W., Li, M., Zheng, J., Zhang, F., Zhang, X., Osman Hamid Mohammed, S., Fan, L., Liu, Z., Chen, F., Chen, Y. & Ingenhoff, J. (2022). Water evaporation reduction by the agrivoltaic systems development. *Solar Energy*, 247, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.022>
- Andrew, A.C., Higgins, C.W., Smallman, M.A., Graham, M. & Ates, S. (2021). Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.659175> [2023-03-02]
- Andrew, A.C., Higgins, C.W., Smallman, M.A., Prado-Tarango, D.E., Rosati, A., Ghajar, S., Graham, M. & Ates, S. (2024). Herbage and sheep production from simple, diverse, and legume pastures established in an agrivoltaic production system. *Grass and Forage Science*, gfs.12653. <https://doi.org/10.1111/gfs.12653>
- Armstrong, A., Ostle, N.J. & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11 (7), 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. & Macknick, J.E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2 (9), 848-855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Dedieu, B., Faverdin, P., Dourmad, J.-Y. & Gibon, A. (2008). Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. Charley, B., Herpin, P., & Perez, J.-M. (éd.) (Charley, B., Herpin, P., & Perez, J.-M., éd.) *Productions Animales*, 21 (1), 45-58
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A. & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36 (10), 2725-2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Edouard, S., Combes, D., Van Iseghem, M., Ng Wing Tin, M. & Escobar-Gutiérrez, A.J. (2023). Increasing land productivity with agriphotovoltaics: Application to an alfalfa field. *Applied Energy*, 329, 120207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120207>
- Fonsêca, V.F.C., Culhari, E.D.A., Moura, G.A.B., Nascimento, S.T., Milan, H.M. & Maia, A.S.C. (2023). *Shade of Solar Panels Relieves Heat Load Of Sheep Managed in Tropical Areas*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4334844>
- Ghosh, A. (2023). Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review. *Solar Energy*, 266, 112146. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112146>
- Goetzberger, A. & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1 (1), 55-69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Gonocruz, R.A., Nakamura, R., Yoshino, K., Homma, M., Doi, T., Yoshida, Y. & Tani, A. (2021). Analysis of the Rice Yield under an Agrivoltaic System: A Case Study in Japan. *Environments*, 8 (7), 65. <https://doi.org/10.3390/environments8070065>
- Gonzalez-Rivas, P.A., Chauhan, S.S., Ha, M., Fegan, N., Dunshea, F.R. & Warner, R.D. (2020). Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. *Meat Science*, 162, 108025. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025>





- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A.P., Moldenke, A.R., DeBano, S.J., Best, L.R. & Higgins, C.W. (2021). OPEN Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral. *Scientific Reports*,
- Kampherbeek, E.W., Webb, L.E., Reynolds, B.J., Sistla, S.A., Horney, M.R., Ripoll-Bosch, R., Dubowsky, J.P. & McFarlane, Z.D. (2023). A preliminary investigation of the effect of solar panels and rotation frequency on the grazing behavior of sheep (*Ovis aries*) grazing dormant pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, 258, 105799. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105799>
- Kyung-Soo, K.O.-H. L. (2021). Agrophotovoltaic Designs : Irradiation Analysis on and under PV Modules. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 41 (2), 9-23. <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.2.009>
- Lama, R.K. & Jeong, H. (2024). Design and Performance Analysis of Foldable Solar Panel for Agrivoltaics System. *Sensors*, 24 (4), 1167. <https://doi.org/10.3390/s24041167>
- Lenis Sanin, Y., Zuluaga Cabrera, A.M. & Tarazona Morales, A.M. (2016). Adaptive Responses to Thermal Stress in Mammals. *Revista de Medicina Veterinaria*, (31), 121-135
- Liu, H.W., Cao, Y. & Zhou, D.W. (2012). Effects of shade on welfare and meat quality of grazing sheep under high ambient temperature1. *Journal of Animal Science*, 90 (13), 4764-4770. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5361>
- Marai, I.F.M., El-Darawany, A.A., Fadiel, A. & Abdel-Hafez, M.A.M. (2007). Physiological traits as affected by heat stress in sheep—A review. *Small Ruminant Research*, 71 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.10.003>
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L. & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Nagashima, A. & 長島彬, *Sunlight power generation system*. JP2005277038A. (2005). <https://patents.google.com/patent/JP2005277038A/en> [2024-04-11]
- Oleskewicz, K. (2020). The Effect of Gap Spacing Between Solar Panel Clusters on Crop Biomass Yields, Nutrients, and the Microenvironment in a Dual-Use Agrivoltaic System. <https://doi.org/10.7275/15996616>
- Panagakos, P. (2016). TECHNICAL NOTE: POTENTIAL SEASONAL HEAT STRESS OF SHEEP: ASSESSMENT OF FOUR HUSBANDRY AREAS IN GREECE. *Applied engineering in agriculture*, 32. <https://doi.org/10.13031/aea.32.11451>
- Pang, K., Van Sambeek, J.W., Navarrete-Tindall, N.E., Lin, C.-H., Jose, S. & Garrett, H.E. (2019). Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. *Agroforestry Systems*, 93 (1), 11-24. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0067-8>
- Pascaris, A.S., Schelly, C. & Pearce, J.M. (2020). A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics. *Agronomy*, 10 (12), 1885. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121885>
- Perna, A., Grubbs, E.K., Agrawal, R. & Bermel, P. (2019). Design Considerations for Agrophotovoltaic Systems: Maintaining PV Area with Increased Crop Yield. *Proceedings of 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, juin 2019. 0668-0672. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8981324>
- Phythian, C.J., Michalopoulou, E., Jones, P.H., Winter, A.C., Clarkson, M.J., Stubbings, L.A., Grove-White, D., Cripps, P.J. & Duncan, J.S. (2011). Validating indicators of sheep welfare through a consensus of expert opinion. *Animal*, 5 (6), 943-952. <https://doi.org/10.1017/S1751731110002594>
- Reasoner, M. & Ghosh, A. (2022). Agrivoltaic Engineering and Layout Optimization Approaches in the Transition to Renewable Energy Technologies: A Review. *Challenges*, 13 (2), 43. <https://doi.org/10.3390/challe13020043>
- Sánchez Ortiz, H., Dittmann, S., Meza, C. & Gottschalg, R. (2023). Comparison of Different AgriPV Layouts in Terms of Photovoltaic Energy Yield Output. 574 kB, 4 pages. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2023/4DO.2.2>





- Sekiyama, T. & Nagashima, A. (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments*, 6 (6), 65. <https://doi.org/10.3390/environments6060065>
- Seyedpour Esmaeilzad, N., Gürsel Dino, İ., Güney, D., Ersoy Yıldırım, Y., Turan, R. & Özden, T. (2024). Shading Effect of Transparent Photovoltaic Panels on Crops Underneath Agrivoltaic Systems. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 1. <https://doi.org/10.52825/agripv.v1i.702>
- Sharpe, K.T., Heins, B.J., Buchanan, E.S. & Reese, M.H. (2021). Evaluation of solar photovoltaic systems to shade cows in a pasture-based dairy herd. *Journal of Dairy Science*, 104 (3), 2794-2806. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18821>
- Telangana State Agricultural University, Rajendranagar, Hyderabad, Telangana, India, Bonthala Madhukar, A., Nalabolu Vikram, A.S., M. Santhosh Kumar, M.S.C. & Kumar, K.A. (2023). Agrivoltaics: A Sustainable Method Of Farming For Various Suitable Crops. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal*, 11 (12), 208-216. <https://doi.org/10.58321/AATCCReview.2023.11.04.208>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I. & Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41 (5), 59. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- Widmer, J., Christ, B., Grenz, J. & Norgrove, L. (2024). Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277>
- Yavari, R., Zaliwciw, D., Cibin, R. & McPhillips, L. (2022). Minimizing environmental impacts of solar farms: a review of current science on landscape hydrology and guidance on stormwater management. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2 (3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac76dd>

