



**Projet pilote d'ombrières agrivoltaïques
Site de Saint-Pierre-des-Bois (72)**

Dossier de demande d'examen au cas par cas

Annexe 8

Note technique sur la synergie avec l'usage agricole

55 Allée Pierre Ziller, Atlantis 2

06560 Valbonne

France

Septembre 2023

SOMMAIRE

1	Préambule.....	3
2	Etat de l'art	4
2.1	Impacts du réchauffement climatique sur l'agriculture	4
2.1.1	Effets du réchauffement climatique.....	4
2.1.2	Consequences sur l'agriculture	5
2.2.	Usage de l'agroforesterie et bénéfices de l'ombrage	7
2.1.1.	Abri pour les animaux	7
2.1.2.	Creation d'un micro-climat	7
2.1.3.	Combiner agriculture et photovoltaïque.....	8
3.	Présentation de l'exploitation	10
3.1.	Conduite d'élevage	10
3.2.	Surface agricole utilisée	10
3.3.	Signe de qualité	10
3.4.	Pourquoi se tourner vers l'agrivoltaïsme	11
4.	Solution agrivoltaïque	11
4.1.	Réponses aux besoins agricoles exprimés.....	11
4.1.1.	Partage de la lumière	11
4.1.2.	Construire une synergie agricole.....	14
5.	Conduite du Projet expérimental	15
5.1.	Objectifs du projet expérimental	15
5.2.	Surface expérimentale.....	16
5.2.1.	Plan d'exploitation	16
5.2.2.	Aménagements pour l'expérimentation	16
5.2.3.	Adaptation du tracking.....	18
5.2.4.	Echantillon.....	18
5.3.	Matériels et méthodes	19
5.3.1.	Materiel	19
5.3.2.	Paramètres agronomiques : prairies multi-espèces.....	22
5.3.3.	Paramètres environnementaux	26
5.3.4.	Bien-être animal.....	26
5.3.5.	Performances zootechniques.....	29
5.3.6.	Champs electromagnétiques.....	31
5.3.7.	Bilan économique.....	33
5.3.8.	Bilan carbone.....	33
5.4.	Acteurs impliqués.....	33
5.4.1.	Rôle de l'éleveur.....	33
5.4.2.	Rôle de TSE	34
5.4.3.	Les partenaires scientifiques et prestataires	34
6.	Bibliographie	35

1 PREAMBULE

Les objectifs nationaux de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) prévoient de passer de 11,5 GW de capacité solaire installée à fin mars 2021 à entre 35,1 et 44 GW en 2028. Pour atteindre ces objectifs, le gisement de sites en reconversion de grande taille n'est pas suffisant, et il sera nécessaire de déployer des solutions agrivoltaïques non seulement vertueuses en réponse à un besoin du monde agricole, mais également rentables sans soutien public à court terme.

Dans un contexte de double nécessité d'adaptation aux changements climatiques pour les agriculteurs et de besoin de nouvelles capacités de production d'énergie solaire, TSE a développé un concept novateur avec une valeur ajoutée forte pour les deux dimensions agricole et photovoltaïque.

La filière agrivoltaïque est encore à ses prémices en France, et comme tout projet d'énergies renouvelables, la réussite du développement de ces projets dans les territoires tient en l'acceptabilité et la démonstration de la valeur ajoutée pour chacune des parties prenantes (agriculteurs, propriétaires foncier, chambres agricoles, coopératives, ...). En travaillant main dans la main avec la filière agricole pour répondre prioritairement à ses besoins, TSE a initié un travail considérable en R&D depuis 2019 pour aboutir à la conception de solutions agrivoltaïques durables, répondant aux besoins d'un grand nombre d'exploitants agricoles. TSE a construit un pool d'expertises de premier plan nécessaire à l'élaboration et au suivi des expérimentations agricoles, avec une équipe d'ingénieurs et doctorants, complétée par l'excellence technique de nos partenaires (PURPAN, IDELE, Coopératives agricoles et Chambres d'Agricultures).

L'ombrière d'élevage permet de s'implanter sur des terrains présentant des pentes jusque 30% et s'adapte à tout type de géométrie de terrain lui procurant une grande souplesse d'implantation. Cette solution offre la possibilité de choisir un espace inter-rangée de largeur variable et adaptable aux pratiques de l'éleveur. Cette solution vise à garantir une agriculture durable et améliorer les performances des prairies tout en apportant un bien-être aux animaux d'élevage et en produisant de l'énergie verte. Ce système d'ombrière a pour but de répondre aux besoins des agriculteurs et de les aider à lutter contre les aléas climatiques grâce aux panneaux solaires rotatifs générant un ombrage tournant et un lissage des stress abiotiques (thermique, hydrique). Les données des sondes et capteurs permettront d'analyser les différents impacts agro-climatiques générés par l'ombrage partiel. Une étude approfondie sur 3 ans permettra de quantifier les effets bénéfiques attendus sur les différents mélanges multi-espèces de prairies et types d'élevage. Cette démarche expérimentale est menée étroitement avec les éleveurs, pleinement associés à chaque étape. Ces derniers percevront un complément de revenus pour leur collaboration à l'expérimentation, afin de les inciter à poursuivre leur activité tout en renforçant sa pérennité. L'analyse dans la durée et les retours d'expérience de ces expérimentations permettront également de démontrer et de chiffrer les différentes synergies agricoles et énergétiques, afin de coupler cette innovation technique aux exploitations présentant les meilleurs co-bénéfices.

Pour démontrer la pertinence et l'efficacité du concept sur différentes pratiques de culture et d'élevage, TSE souhaite mener à bien plusieurs projets pilotes, dont un à Saint-Pierre-des-Bois dans le département de la Sarthe (72), en réponse à un besoin clair de la part de l'éleveur de réduire le stress thermique et hydrique pour améliorer la qualité, la disponibilité et la pousse des pâtures, ainsi que les performances zootechniques, le bien-être et la santé des bovins allaitants.

2 ETAT DE L'ART

2.1 IMPACTS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE

2.1.1 EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Ces dernières années, les bouleversements climatiques dont l'intensité augmente chaque année entraînent à la surface du globe des phénomènes météorologiques de plus en plus extrêmes et fréquents. Les effets du réchauffement climatique sont observables depuis au moins 30 ans, comme le montrent les relevés de températures de Météo France (cf. Figures 1 à 3) ainsi que les projections des chambres d'agriculture, de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) et de l'AREC (Agence Régionale Energie-Climat). Ces effets se traduisent par :

- Une hausse moyenne et continue des températures printanières (en journée) et estivales,
- Des périodes sans précipitations de plus en plus longues,
- L'apparition d'accidents climatiques toujours plus fort et plus fréquents (i.e. orages violents, vent, grêle, gel, etc.).

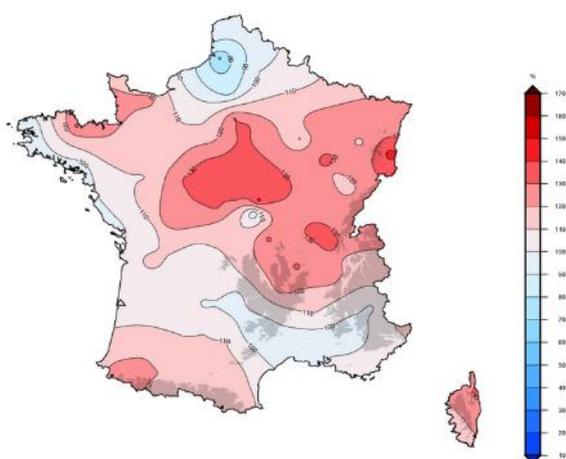


Figure 2. Rapport à la moyenne saisonnière de référence 1991-2010 de la durée d'ensoleillement.

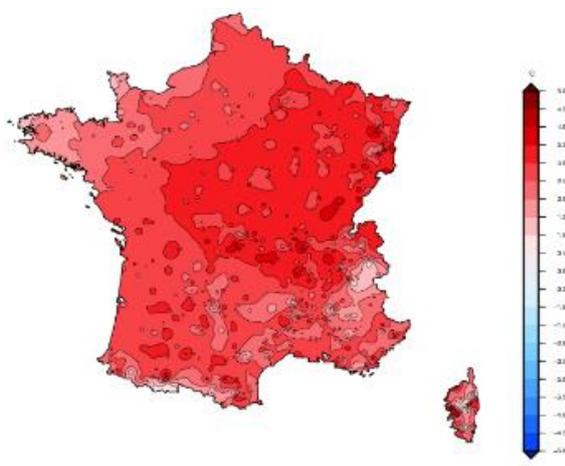


Figure 3. Ecart à la moyenne saisonnière de référence 1981-2010 de la température moyenne.

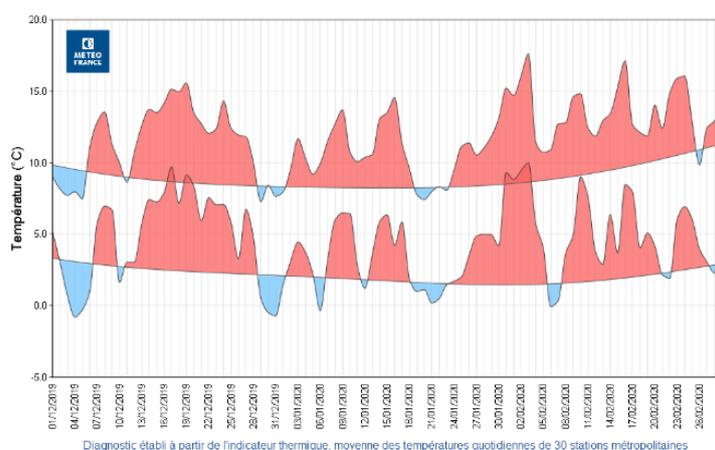


Figure 1. Evolution des températures minimales et maximales quotidiennes en France par rapport à la normale quotidienne du 1er décembre 2019 au 29 février 2020.

Les conséquences de ces événements ont un impact direct sur les productions agricoles et les pertes liées à ces aléas (inondations, fortes chaleurs, sécheresse, gel, tempêtes, ...) vont continuer de croître. Depuis 2018

notamment, les exploitations agricoles ont souffert du manque d'eau, qui a négativement impacté leurs prairies et rendements (toutes espèces confondues).

2.1.2 CONSEQUENCES SUR L'AGRICULTURE

2.1.2.1 AUGMENTATION DES TEMPERATURES PRINTANIERES ET ESTIVALES

Depuis plusieurs années, des températures très fortes sont relevées en période estivale, et les retours de nombreux producteurs laitiers le confirment. En effet, les fortes chaleurs entraînent un stress thermique important chez les bovins laitiers devant ainsi mobiliser leur énergie pour thermoréguler leur organisme aux dépens de leur production de lait. Le stress thermique est mesuré par l'indicateur THI « Temperature Humidity Index » (cf. Figure 4) qui prend la température ambiante et l'humidité relative. A titre d'exemple, pour une valeur au-delà de 68, correspondant à une température de 22°C et avec une humidité relative de 50%, une vache laitière subit déjà un stress léger ayant des impacts sur sa production.

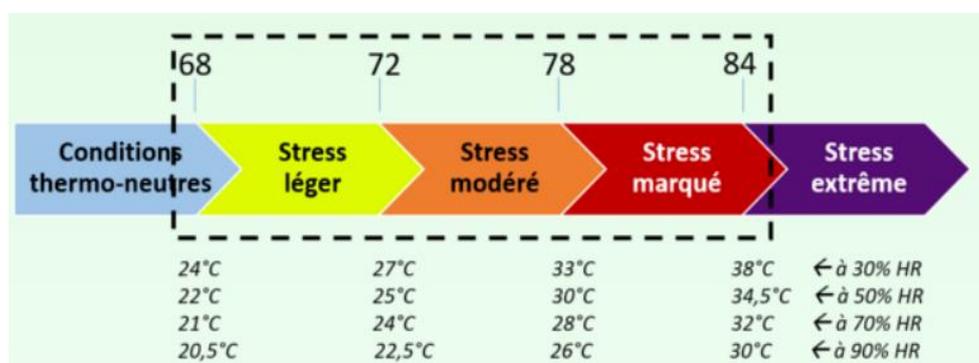


Figure 4. Niveaux de stress thermique des animaux selon les conditions climatiques.

En effet, il faut savoir que la première adaptation des ruminants en cas de stress thermique est de limiter l'ingestion d'aliment. Les conséquences sont alors néfastes sur la performance laitière des troupeaux (Renna et al. 2010), sur l'efficacité de la reproduction (Armstrong, 1994) ou sur le gain moyen quotidien des animaux à l'engraissement.

Les performances zootechniques des animaux d'élevages sont également impactées par le ralentissement de la pousse des prairies. Des espèces majeures entrant dans la composition des prairies telles que le ray-grass anglais ou hybride, la fléole, le trèfle blanc et violet ou la luzerne sont très sensibles aux sols séchant et donc à la sécheresse.

Le ray-grass, par exemple, ralentit et stoppe sa croissance dès 23-25°C. Ainsi, il n'est plus à disposition des animaux au pâturage et contraint les éleveurs à rentrer en bâtiments d'élevage et/ou à les compléter. Les sécheresses se produisant de plus en plus tôt limitent également la pousse des prairies et retarde les dates de fauches et/ou limite les rendements fourragers de celles-ci.

Le développement des espèces végétales sont impactées à divers niveaux par l'augmentation des températures, engendrant alors de lourdes pertes de rendement et donc économiques :

- Diminution de la viabilité du pollen : l'émission du pollen décroît à partir de 30°C et sa viabilité est affectée au-delà de 37°C. Couplée à un retard d'émission des soies, elle peut causer une forte réduction du potentiel de rendement,
- Diminution de la fécondation,
- Diminution du remplissage du grain et du Poids Moyen Grain.

L'augmentation des températures est également à la source de nombreux épisodes caniculaires récurrents. L'assèchement des végétaux et des sols est propice aux incendies, notamment lors de la récolte des céréales à paille. L'année 2019 a particulièrement été marquée par de nombreux sinistres (« Les incendies de moisson placés sous haute surveillance », 2020).

2.1.2.2 EPISODES D'INTEMPERIES IRREGULIERS (ORAGES, GRELE, INONDATIONS, ...)

Les intempéries (i.e. orages, grêle, etc.) se multiplient, rendant les semis et les récoltes difficiles (« Intempéries : quelles conséquences pour l'agriculture ? », 2018).

En 2021, d'autres conditions ont impacté les grandes cultures, notamment les précipitations violentes et les orages qui se sont déversés à intervalles réguliers, comme le souligne le Communiqué de Presse de la FNSEA du 26 août 2021 – « *L'année avait débuté par des épisodes de gel d'une ampleur exceptionnelle ayant sérieusement amputé la production 2021 de fruits et de raisins. Elle s'est poursuivie, cet été, par des inondations d'une ampleur jamais vue, liées à des phénomènes orageux et à une pluviométrie exceptionnelle qui ont largement perturbé les récoltes. A cela se sont ajoutés des incendies très importants.* » (FNSEA 2021). Ces fortes pluies rencontrées ont provoqué l'inondation de nombreuses parcelles, parfois à la suite des crues.

L'hydromorphie des sols peut entraîner des conséquences délétères sur les espèces végétales, en particulier pour des stades clés tels que les semis ou les levées. L'hydromorphie entraîne une anoxie, c'est-à-dire une baisse de la disponibilité de l'oxygène nécessaire à la respiration des cellules. Un ralentissement, voire un arrêt complet du métabolisme de la plante peut s'observer. Ce sont notamment les racines qui sont les plus impactées car en cessant de fonctionner, les stomates se ferment, bloquent la photosynthèse et inhibent l'absorption d'azote.

Les pluies courtes et intenses qui s'abattent, ne permettent pas à l'eau de pouvoir s'infiltrer correctement dans les sols et entraînent :

- Un lessivage des produits phytopharmaceutiques et effet phytotoxique racinaire,
- L'apparition des croûtes de battance,
- L'augmentation du risque de verse,
- Lors de la phase de maturation : retard de la maturation (en cas de pluies régulières avant la récolte) et du séchage du grain,
- Des destructions dans les champs.

2.1.2.3 GELS PRINTANIER SUIVIS DE FORTES AMPLITUDES THERMIQUES

Les épisodes de gels au mois d'avril ont toujours été présents mais les hivers plus cléments associés à des chaleurs de plus en plus tôt entraînent des éclosions précoces de la végétation. Le débourrement arrive avec de l'avance et les bourgeons sont particulièrement sensibles au gel. Le gel printanier de 2021 avait provoqué de très fortes pertes de cultures sur le territoire français car plus de 70% de celui-ci a été touché, à des degrés divers. Les conditions d'avril 2021, 12 jours avec de très faibles températures nocturnes sur les 17 premiers jours d'avril suivis d'importants écarts de températures ont provoqué des dégâts majeurs sur les vignes, les cultures d'automne (i.e. céréales, colza, betterave, ...) et dans les vergers (i.e. abricotiers, cerisiers, pommiers, ...) (« Gaillac. "Après ce gel exceptionnel, il faut laisser la vigne tranquille" assure Olivier Yobrégat, ingénieur agronome », 2021 ; « Pertes liées au gel : les agriculteurs commencent à sortir leur ardoise », 2021).

Couplé à un manque d'eau et à la fraîcheur persistante en avril-mai, ce gel a momentanément ralenti la pousse et le rendement des prairies permanentes. Dans de nombreuses régions, ces dégâts de gel ont été suivis de stress hydriques qui ont notamment affecté les vignobles méridionaux et les céréales (blé, orge) et provoqué des pertes de rendement lorsque l'irrigation n'a pas été possible. Des pluies intenses ont aussi impacté les vignobles septentrionaux, qui connaîtront la plus faible récolte depuis le début du 20^{ème} siècle, avec 30 à 35% de pertes estimées à ce jour (« Vignes : la récolte 2021 sera "la plus faible du siècle dernier et du siècle actuel", selon le président national des Vignerons indépendants », 2021).

Face aux pertes économiques considérables, les agriculteurs cherchent à se prémunir au maximum de ces phénomènes climatiques récurrents et de plus en plus violents.

2.2. USAGE DE L'AGROFORESTERIE ET BENEFICES DE L'OMBORAGE

Les questions de valorisation du pâturage combinée à l'augmentation prévisible des aléas climatiques obligent la profession à se questionner sur les solutions pouvant protéger les cultures et leurs animaux. Par exemple, des retours d'expérience sont déjà disponibles sur la mise en place de systèmes agroforestiers, permettant de combiner les performances économiques, agronomiques et environnementales au cœur des exploitations.

L'implantation d'arbres et haies rendent directement et indirectement des services à l'agriculture et de nombreux bénéfices peuvent être présentés.

2.1.1. ABRI POUR LES ANIMAUX

La présence d'arbres et/ou de haies dans les prairies permet aux animaux d'élevages de venir s'abriter du froid et des intempéries, mais également d'y trouver un ombrage partiel. En effet, nous avons vu précédemment que les animaux étaient très sensibles aux fortes chaleurs provoquant un stress thermique et impactant leurs performances zootechniques. L'ombre portée des arbres contribue directement au bien-être des animaux qui dépensent moins d'énergie pour se thermoréguler et de mieux assimiler les fourrages verts eux-mêmes impactés positivement par l'ombre. Des études simulant des systèmes agroforestiers (mise en place de parasols imitant la présence d'arbres) en élevages laitiers ont déjà montré plusieurs effets positifs de l'ombre générée sur le troupeau laitier. Celle-ci a un effet bénéfique sur le temps de pâturage et sur la quantité d'herbe ingérée : les génisses bénéficiant d'un ombrage ont pâturé plus longtemps et ainsi ingéré plus d'herbe que celles qui n'en bénéficiaient pas. L'absence d'ombrage a aussi révélé avoir un effet négatif sur le comportement des animaux : ceux ne bénéficiant pas d'ombre présentaient des comportements indiquant un stress (moins de déplacement, moins de consommation d'herbe, certains animaux haletants...). Ce stress, et le nombre de déplacements, étaient atténués grâce à la présence d'ombre. Cette atténuation a permis d'améliorer les performances de croissance des animaux (i.e. GMQ, Gain Moyen Quotidien) (« Agroforesterie et élevage », 2018). Si les bovins cherchent l'ombre plutôt en période de fortes chaleurs estivales, d'autres animaux d'élevage n'expriment pas le même besoin. Par exemple, les brebis recherchent activement l'ombre, y compris en dehors des périodes estivales et de façon croissante avec l'augmentation des températures et du rayonnement (Ginane et al., 2018).

L'institut de l'élevage (IDELE) en France, l'université de l'Oregon (Andrew et al. 2021) ont démontré que l'ombrage partiel sur une prairie avait plusieurs effets positifs. Il est observé une meilleure disponibilité des espèces végétales et un temps de pâturage plus long pour les bovins puisque la densité de la prairie n'est pas affectée. Comme déjà évoqué, c'est d'autant plus vrai pour l'un des composants majeurs des prairies, le Ray-Grass Anglais, très utilisé pour sa facilité d'installation, sa tolérance au piétinement, sa très bonne valeur fourragère et protéique, mais très sensible aux fortes chaleurs (stress thermique) qui affectent significativement sa croissance.

2.1.2. CREATION D'UN MICRO-CLIMAT

Les haies et arbres implantés à proximité de cultures permettent de diminuer l'amplitude thermique et de réduire l'évapotranspiration des plantes. Cela permet alors une économie de la ressource en eau et rend certaines cultures moins sensibles à la sécheresse. Ces effets bénéfiques s'observent en particulier grâce à l'ombrage porté par les arbres sur les plantes. Des études récentes en agroforesterie ont montré que le blé pouvait très bien répondre à l'ombrage partiel (Arenas-Corraliza et al. 2019). En effet, sur des variétés standard et couramment commercialisées ils ont montré que le blé et l'orge pouvaient avoir de meilleurs rendements sous 50% d'ombrage en agroforesterie que naturellement, mais réagissaient de manière différente physiologiquement pour l'orge, morphologiquement pour le blé (i.e. augmentation de la surface foliaire). Les

deux espèces ont augmenté leur rendement jusqu'à 19% en conditions de mi-ombre. Grâce à son comportement en phases claire et obscure de la photosynthèse (i.e. activité, taux de chlorophylle et caroténoïdes) et son point de compensation lumineuse plus faible, l'orge semblerait être une espèce plus facilement adaptable à la culture sous ombrage partiel. Mais dans les deux cas, des variétés commerciales récentes, donc utilisées couramment par les agriculteurs et référencées par leurs coopératives, ont montré une plasticité suffisante pour bien produire dans ces conditions et profiter du lissage des stress dus aux évolutions climatiques. (Silva-Pérez et al. 2020) décrit des essais sur blé tendre et blé dur (i.e. plante en C3), et montre que les diverses variétés de blé réagissent différemment à la photosynthèse, qu'il existe une grande variabilité génotypique ainsi qu'une bonne héritabilité sur son efficacité, en relation avec la fertilisation et l'environnement.

Les différences se situent au niveau du statut hydrique foliaire (i.e. teneur relative en eau), de la photosynthèse nette, de l'activité photochimique du photosystème II et de la résistance stomatique. La baisse de température joue sur les phytochromes (i.e. photorécepteurs) et exerce une influence positive sur la concentration en chlorophylle et en caroténoïdes.

Evidemment, ce caractère de « tolérance à l'ombrage partiel » est fortement dépendant de l'effet variétal, comme c'est le cas pour les performances agronomiques telles que la rusticité (i.e. adaptation aux différentes conditions pédoclimatiques), la production grainière, la composition et qualité de l'huile et/ou des protéines, la tolérance à des stress ou à des maladies. Des publications de (Valladares et Niinemets 2008) et plus récemment (Xu, Hu, et Poethig 2021) ont aussi confirmé le principe d'adaptation potentielle des plantes aux conditions ombragées, appelée en anglais le « Shade Tolerance Syndrome ». Les végétaux qui se développent sous une faible intensité lumineuse présentent un phénotype particulier permettant d'optimiser l'assimilation carbonée et l'activité photosynthétique dans cette situation, similaire à celui des plantes en phase juvénile de développement (sur le modèle *Arabidopsis thaliana* en culture in-vitro, une faible intensité lumineuse prolonge cette phase).

Bien que l'agroforesterie présente de nombreux avantages pour l'agriculture ou l'élevage, cette pratique trouve quelques limites. Si les arbres ou les haies ne sont pas implantés, le temps que ceux-ci poussent allonge le retour sur investissement des agriculteurs. A cela s'ajoute un surplus de travail imposé par les divers entretiens des arbres tels que la taille des racines, des branches, etc. Ces limites imposent donc de repousser à nouveaux les réflexions pour trouver des alternatives à l'ombrage partiel des arbres.

2.1.3. COMBINER AGRICULTURE ET PHOTOVOLTAÏQUE

Largement utilisés pour l'éco-pâturage dans les villes ou sur les terrains des entreprises privées, les ovins sont apparus dans l'entretien des prairies des centrales photovoltaïques au sol. Ils pouvaient alors bénéficier de l'ombrage porté par les panneaux solaires et une amélioration du bien-être des animaux est supposée mais n'a jamais été clairement évaluée. Ainsi, la réflexion autour de la combinaison entre l'élevage et/ou l'agriculture et le photovoltaïque s'est profilée et laisse émerger un nouveau système agricole : « L'agrivoltaïsme ». La bibliographie et les retours d'expérience montrent qu'il existe bon nombre d'activités agricoles possibles sous les panneaux solaires et recensent plusieurs exemples en France et dans le monde : maraîchage, arboriculture, viticulture, horticulture, grandes cultures, élevage, etc.

Aujourd'hui, des élevages sous ombrage photovoltaïque existent (i.e. projets au Japon) pour des volailles et bovins. Cependant, peu de paramètres zootechniques ou de bien-être animal sont étudiés.

Les chercheurs japonais commencent à s'intéresser au bien-être animal sous ces structures mais rien n'est publié à ce jour. Aux Etats-Unis, des structures sont installées pour apporter un ombrage estival aux animaux, mais aucun des paramètres cités précédemment n'a été réellement étudié.

Des expérimentations récentes en agrivoltaïsme (sur des espèces de grandes cultures) et en agroforesterie (sur blé et orge notamment) ont déjà montré les effets positifs et les avantages potentiels de l'ombrage partiel en

termes de productivité (Dupraz et al. 2011; Valle et al. 2017; Elamri et al. 2018), et de bénéfices économiques et agronomiques pour les exploitants, surtout dans les régions où les terres agricoles et les conditions environnementales sont souvent défavorables pour les cultures (Marrou et al. 2013; Marrou, Dufour, et Wery 2013; Ravi et al. 2016; Dinesh et Pearce 2016). La baisse des radiations solaires joue aussi sur l'évapotranspiration (moins importante), l'humidité et la température du sol, en générant des conditions plus favorables pour la croissance en non irrigué. Dans le cas du maïs (i.e. espèce qui n'est pas la plus tolérante à l'ombre) selon la densité des panneaux photovoltaïques, il est possible d'avoir dessous une hausse de la biomasse (Sekiyama et Nagashima 2019). Des essais portant sur certaines cultures maraichères ont prouvé une bonne tolérance aux conditions ombragées notamment sous structures agrivoltaïques malgré les difficultés de mécanisation : les espaces réduits entre les poteaux soutenant la structure ne permettaient pas le passage de toutes les machines agricoles, et donc la conduite de certaines grandes cultures parallèlement au maraîchage (Marrou et al. 2013).

Cependant, toutes les espèces et variétés ne réagissent en effet pas de la même manière sous l'ombrage. Une étude chinoise menée sur le maïs (i.e. plante en C4) et sur 24 cultivars a montré que 14 se comportaient bien sous l'ombrage de panneaux photovoltaïques (i.e. shade-tolerant type) et 10 étaient plus sensibles aux conditions modifiées (Fu et al. 2009).

Il est indispensable de trouver des solutions durables et innovantes permettant, au moins partiellement, de réduire et lisser ces différents stress et accidents climatiques afin de préserver le potentiel agricole. Parmi les systèmes pouvant apporter une réponse partielle à ces problématiques, l'agrivoltaïsme, basé sur le principe étagé permettant de générer de l'électricité tout en laissant au sol son usage agricole s'avère être une piste prometteuse. Afin de tirer profit des deux activités de manière pérenne, une synergie doit être recherchée entre production agricole et production solaire. Les rendements respectifs de chacune des deux activités sont en effet conditionnés par le partage de l'espace disponible et de l'ensoleillement. Les solutions techniques pour l'implantation de panneaux en surface agricole sont multiples, et de nombreuses pistes de recherche et d'expérimentation sont en cours, en partenariat avec le monde agricole et ses représentants. Il sera possible de concilier de la production d'énergie renouvelable avec une agriculture raisonnée (i.e. mélanges floristiques diversifiés, conservation des sols, réduction des intrants phytopharmaceutiques), incluant des variétés et de conduites culturales adaptées aux conditions pédoclimatiques contraignantes.

Il s'agit donc de trouver l'architecture optimale, permettant d'atteindre un point d'équilibre entre productions énergétique et agricole, en tenant compte de l'ensemble des contraintes et exigences liées à chacune.

3. PRESENTATION DE L'EXPLOITATION

Le GAEC de la Croix Glorieuse est installé depuis 2015 et est géré par Bruno et Lucas DAVID. L'exploitation est en agriculture conventionnelle.

Leur deuxième fils, Guillaume réalise des études agricoles et devrait rejoindre l'exploitation à l'issue de son cursus scolaire. Guillaume est actuellement en formation par la voie de l'apprentissage au sein de l'exploitation de ses parents. Il est à la gestion du troupeau de bovins allaitants.

Il s'agit d'une exploitation dont l'activité principale est l'élevage de bovins allaitants. Une seconde activité d'élevage de truies (naisseur), environ 160 truies, est également menée sur cette exploitation.

3.1. CONDUITE D'ELEVAGE

Le cheptel de bovins allaitants est de race Maine d'Anjou ou désormais appelée « Rouge des prés » et recense entre 50 et 65 vaches allaitantes. Il est divisé en 2 troupeaux avec un taureau par troupeau.

Les vaches sont à l'herbe de mars à fin novembre et de l'ensilage d'herbe est distribué en cas de sécheresse et de manque de stock sur pied. Lorsque les bovins rentrent en phase de finition, ceux-ci sont rentrés en bâtiment.

Chaque année, 150 à 200 taurillons sont achetés uniquement pour la phase d'engraissement et de finition.

3.2. SURFACE AGRICOLE UTILISEE

La surface agricole utilisée du GAEC compte 125 hectares dont 50 hectares de prairies temporaires consacrées au pâturage et à la production d'ensilage d'herbe. L'objectif étant de se rapprocher le plus possible de l'autonomie protéique sur l'exploitation.

3.3. SIGNE DE QUALITE

La viande est vendue sous l'Appellation d'Origine Contrôlée « Maine d'Anjou ». La viande bovin Maine Anjou a une couleur rouge intense. Ce produit agricole a obtenu le 20 décembre 2010, le label européen AOP.

Ce signe de qualité nécessite de respecter un cahier des charges sur les conditions d'élevage et d'abattage auquel il faut prêter attention dans le montage du projet expérimental. A savoir que la mise en place d'une structure agrivoltaïque ne remet pas en question cette appellation.

Les majeures prescriptions à suivre sont les suivantes :

- Ne concerne que les animaux de race rouge des prés avec une charge d'un bovin par hectare,
- Les animaux sont élevés sur des pâtures et au foin de la ferme avant la finition,
- La finition se fait en 60 à 120 jours, avec des concentrés (céréales et protéagineux) entiers ou broyés grossièrement,
- L'ensilage est interdit pendant les 2 mois précédant la finition (le goût de la viande est fait durant la période précédant cette phase),
- Les vaches doivent faire un poids de carcasse de minimum 380 kg de carcasse,
- Les bœufs de 30 mois pèseront au moins 400 kg de carcasse,
- Les bœufs de 36 mois pèseront 500 kg de carcasse.

Les bovins qui ne respecteraient pas ces critères ou seraient déclassés, sont quant à eux revendus à des boucheries, notamment en Bretagne où le débouché semble être plus propice.

3.4. POURQUOI SE TOURNER VERS L'AGRIVOLTAÏSME

Le changement climatique s'est particulièrement illustré sur les 5 dernières années avec des sécheresses estivales souvent marquées et une pluviométrie très basse. Avec de telles augmentations des températures, plusieurs comportements des prairies sont observés tels que :

- Un début de pousse retardé,
- Un ralentissement de la pousse des prairies lors de fortes amplitudes thermiques,
- L'assèchement des prairies et la diminution du rendement fourrager de celle-ci.

Ces effets nécessitent de garder les animaux en bâtiments d'élevage plus longtemps en fin d'hiver. Pour les fortes amplitudes en été, les éleveurs doivent compléter les rations des animaux en pâture avec du fourrage (généralement issu du stock prévu pour l'hiver) car l'herbe n'est plus disponible en quantité suffisante pour couvrir les besoins alimentaires du cheptel. Les coûts pour l'alimentation des animaux augmentent ainsi considérablement.

Les éleveurs observent également leurs animaux en été souffrir de plus en plus de la chaleur. Les bovins se regroupent entre eux et se couchent pour limiter leur dépense énergétique. Ils sont souvent haletants et présentent des signes importants de stress thermique pouvant avoir un impact sur la qualité de leur engraissement. Il est alors nécessaire de rentrer des animaux en bâtiments alors qu'ils auraient dû rester en pâture. Le stress thermique des vaches allaitantes cause également de nombreux avortements impactant alors l'économie de l'exploitation.

La volonté actuelle est de participer à cette étude expérimentale menée sur les bovins et l'ombrière d'élevage pour observer quel sont les effets de l'ombre portée sur le stress thermique des animaux et la productivité des prairies en-dessous. Les résultats obtenus leur permettront de changer leurs pratiques et/ou de laisser leurs animaux en pâture plus longtemps. La mise en place de ce projet permet également de mettre en place une pratique de pâturage tournant, voire de pâturage tournant dynamique et d'améliorer la valorisation des fourrages de l'exploitation.

4. SOLUTION AGRIVOLTAÏQUE

4.1. REPONSES AUX BESOINS AGRICOLES EXPRIMES

La structure permet de conserver son usage agricole et sa désignation au sol et de garder la mécanisation facile (espacement variable entre chaque rangée de tracker ; avec un minimum de 10m), donc de simplifier le travail de l'agriculteur qui n'aura pas à faire évoluer sa flotte, ni ses pratiques.

4.1.1. PARTAGE DE LA LUMIERE

La photosynthèse est un processus se déroulant dans les chloroplastes et au cours duquel la plante convertit l'énergie lumineuse reçue, l'eau et le gaz carbonique absorbés (pour ce dernier via les stomates, pores sur la face inférieure de la feuille), en composés organiques/sucres comme le glucose. Stocké sous forme d'amidon, le glucose fournit de l'énergie à l'ensemble de la plante, accompagné du fructose, il peut se transformer en saccharose. Parallèlement, la plante rejette du dioxygène dans l'atmosphère.

La photosynthèse et son efficacité dépendent de nombreux paramètres tels que :

- La quantité et l'intensité de lumière reçue et assimilée,
- Les longueurs d'ondes absorbées (i.e. rayonnement photosynthétiquement actif : 400-700 nm, cf. Figure 5),
- L'activité chloroplastique,
- La température,

- La durée de photopériode (la nuit et/ou à l'obscurité se déroule la phase d'ombre),
- Le CO₂,
- L'espèce végétale,
- La variété (i.e. génotype).

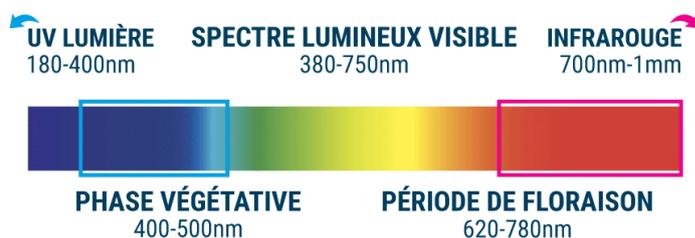


Figure 5. Spectre lumineux et Rayonnement photosynthétiquement actif

La première étape est la phase claire (photochimique, via les photosystèmes 1 et 2). La seconde étape correspond au cycle de Calvin (enzyme Rubisco, activité carboxylase).

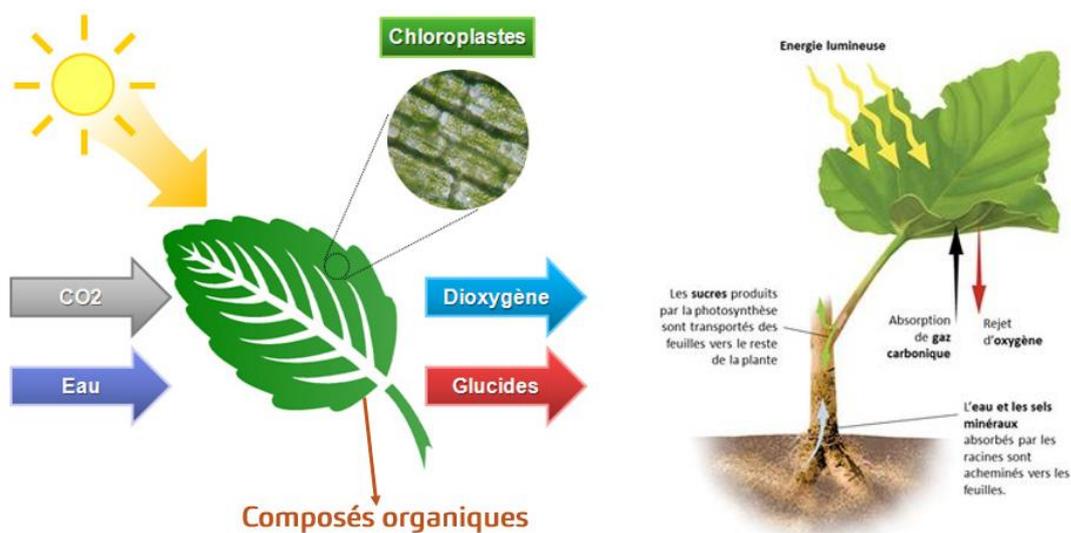


Figure 6. Principe générale de la photosynthèse : conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique, fixation du carbone, synthèse des sucres et teneurs en chlorophylle

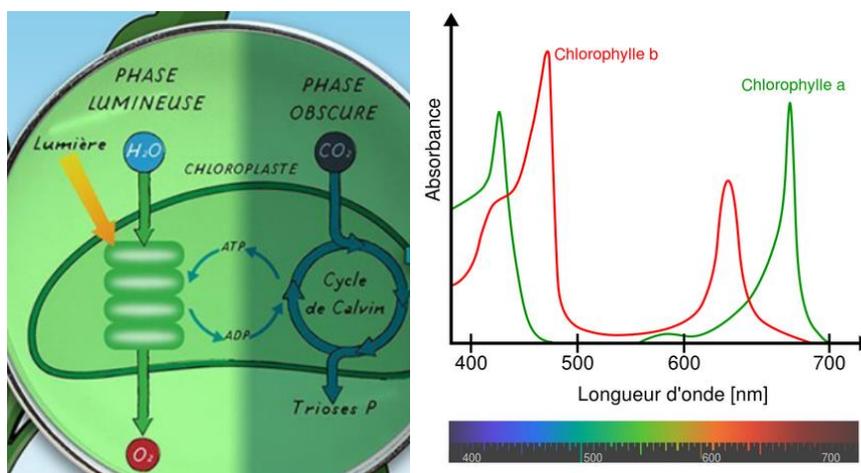


Figure 7. Schéma du fonctionnement du chloroplaste lors des phases lumineuse et obscure (à gauche) et absorption de la lumière par les chlorophylles a et b selon la longueur d'onde (à droite)

La baisse de température résultant de l'ombrière jouera sur les phytochromes (photorécepteurs) avec une influence positive sur la concentration en chlorophylle et en caroténoïdes (Arenas-Corraliza et al. 2019) et sur l'activité photosynthétique. Elle va compenser pour partie ou totalement (selon le stade et les conditions extérieures) celle liée à la moindre luminosité : c'est l'un des principaux points étudiés par l'expérimentation, afin de démontrer qu'il est possible d'avoir une co-production énergétique et agricole, en optimisant les deux simultanément. Les baisses conjuguées de luminosité et de température sous les panneaux photovoltaïques devraient avoir un effet antagoniste sur l'activité photosynthétique des prairies et des cultures (cf. Figure 11), dont il conviendra d'analyser l'activité quotidienne finale réelle afin d'estimer les effets induits par l'ombrière (Barron-Gafford et al. 2019).

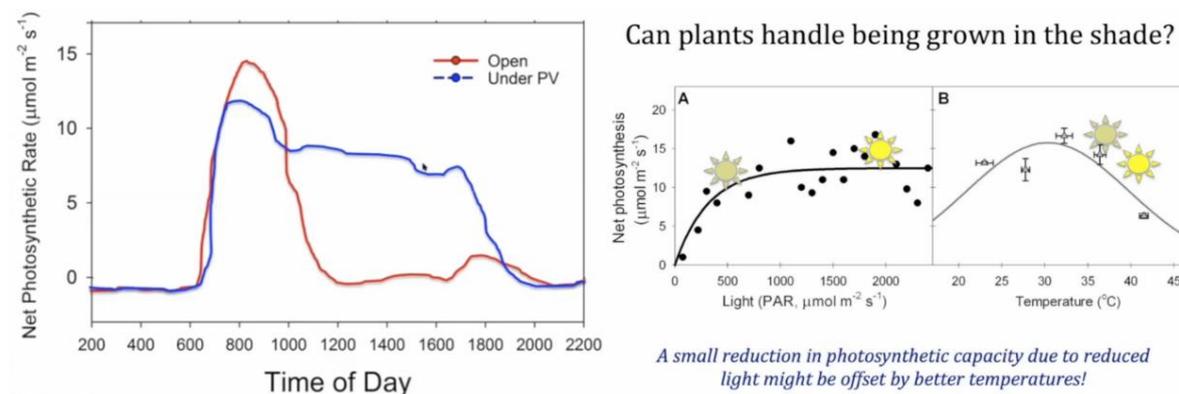


Figure 8. Activité photosynthétique en fonction de la luminosité et de la température

Les sommes de températures journalières seront modifiées, ainsi que les cycles de végétation (i.e. dates des stades repères). Les plantes vont avoir divers comportements en retour à l'ombrage partiel généré : leur réponse peut être morphologique et/ou physiologique.

Chaque espèce végétale et leurs diverses variétés, auront un comportement différent pour la réponse photosynthétique, notamment sur les deux critères suivants :

- **Point de compensation lumineuse** : la quantité d'énergie lumineuse absorbée permet un niveau d'échanges gazeux liés à la photosynthèse compensant exactement ceux de la respiration ;
- **Point de saturation lumineuse** : point à partir duquel le taux maximum de photosynthèse net est atteint, et ne sera plus dépassé. Les plantes dites « d'ombre » présentent une intensité photosynthétique optimale, une intensité de compensation plus faible, mais une efficacité dans l'absorption des photons plus élevée (plantes des sous-bois, laitue).
Les plantes « de lumière » sont moins efficaces dans la capture des photons, mais elles fixent davantage de CO₂ (ex : grandes cultures) et ont un point de saturation lumineuse plus élevé.

Les plantes sont en effet très sensibles à la lumière bleue dans les conditions naturelles : celle-ci influe sur l'ouverture des stomates dès les premières lueurs de l'aube, avant même le lever du soleil, et peut la faire durer après son coucher. La réponse des végétaux serait ainsi un signal devant les besoins en CO₂ atmosphérique et préparerait à la photosynthèse active.

La création d'un ombrage partiel (i.e. 45% environ en cas de projection au sol lorsque les panneaux sont à plat) va entraîner une baisse de la température diurne et de la luminosité. L'adaptation morphologique (i.e. surface foliaire) et/ou physiologique des plantes sera différente selon les espèces végétales. Pour chacune de ces espèces, il conviendra de caractériser l'effet génotype afin de définir un choix de variétés tolérantes à ces conditions d'ombrage pour leur croissance.

4.1.2. CONSTRUIRE UNE SYNERGIE AGRICOLE

Les tables de panneaux intégreront des moto-réducteurs leur permettant de suivre la course du soleil d'est en ouest pour la production électrique, ainsi que de répondre aux besoins spécifiques des cultures à différents moments de la journée. La centrale sera, à tous les endroits stratégiques identifiés, équipée de capteurs météorologiques pour anticiper les changements climatiques (i.e. couverture nuageuse, pluie, grêle, ...) ainsi que de capteurs agricoles tels que des sondes tensiométriques et capacitatives.

Un système d'algorithme permettra de définir en amont, avec l'agriculteur, le positionnement des panneaux selon les conditions climatiques et les pratiques de l'éleveur :

- Limiter la rotation et donc la hauteur minimal des panneaux lorsque les animaux pâturent en dessous ;
- Pivoter à la verticale : en cas de pluie (ou parallèlement à celle-ci) afin d'arroser de manière homogène la parcelle, ou la nuit pour profiter de la rosée ;
- En période de sensibilité au gel printanier et aux grandes amplitudes thermiques, il sera possible de laisser les panneaux à l'horizontale la nuit afin de gagner quelques degrés ;
- En cas de risque de grêle ou de fortes pluies (i.e. jusqu'à une certaine taille – diamètre d'une balle de golf), les panneaux pourront protéger les plantes et les animaux de dégâts majeurs en restant à l'horizontale ;
- Pivoter à la verticale aux aurores et en fin d'après-midi, pour laisser la prairie et les cultures assimiler la lumière bleue et en tirer tous ses bénéfices, notamment en phase de croissance végétative.

Les études des données recueillies permettront d'affiner le process de tracking des panneaux, afin de les positionner de manière optimale tant pour la production agricole que pour la production d'énergie.

Différents impacts positifs de l'ombrière sont attendus sur l'exploitation tels que :

- **Réduction du stress hydrique** : baisse de l'évapotranspiration donc des besoins en eau lors des excès de rayonnement dans certaines conditions, assure une meilleure rétention d'eau dans les sols ;
- **Réduction de l'amplitude thermique** : l'ombrage porté va entraîner un refroidissement sous la structure le jour, quelques degrés de plus que la température ambiante la nuit lorsque les panneaux seront laissés à la l'horizontale, en cas de risque de gel entre l'automne et la reprise de croissance au début du printemps – nous pouvons espérer gagner 2 à 3 °C au moins la nuit dans ces conditions ;
- **Baisse de la température en cas de fortes chaleurs** : effet bénéfique sur la fécondation et le remplissage des grains, teneur en chlorophylle et caroténoïdes ;
- **Augmentation du taux de survie des végétaux et leur croissance en conditions défavorables** (sécheresse, chaleur, ...) ;
- **Réduction du stress thermique des animaux subis en période estivale**, permettant un meilleur bien-être de ces derniers. Il va dans le sens de la directive 98/58/CE concernant la protection des animaux d'élevage qui spécifie : « Les animaux non gardés dans des bâtiments doivent, dans la mesure où cela est nécessaire et possible être protégés contre les intempéries par des moyens adaptés aux conditions météorologiques de la région. » ;
- **Réduction des comportements agonistiques des animaux** : diminution du nombre d'animaux haletants, plus de déplacements, etc.,
- **Amélioration du bilan économique de l'élevage** en limitant l'apport de compléments alimentaires (foin, concentrés) en période estivale grâce à l'amélioration de la survie et de la croissance des prairies multi-espèces sous la structure agrivoltaïque ;
- **Contribution au développement de la biodiversité** : avec une intégration environnementale réfléchie, via le renforcement de haies pluristratifiées en harmonie avec l'environnement local, apportant des bénéfices en termes d'humidité, de pollinisation et de protection contre le vent.

Fruits d'hypothèses et d'observations de la littérature scientifique, ces bénéfices nécessitent d'être validés par un panel de données. Ainsi, des expérimentations seront menées durant 3 ans, sur 3 projets « élevage » dont celui de Villefranche d'Allier, visant à vérifier ces hypothèses et caractériser les effets d'un ombrage partiel et

tournant sur les productions agricoles dans le but d'identifier des pistes d'amélioration pour l'agrivoltaïsme. Ces études viendront compléter celles menées sur la canopée agricole que TSE a développée.

5. CONDUITE DU PROJET EXPERIMENTAL

5.1. OBJECTIFS DU PROJET EXPERIMENTAL

Nous souhaitons, à travers un programme de projets pilotes ambitieux, valider l'adaptation à l'ombrage partiel de différents mélanges multi-espèces de prairies (graminées, légumineuses et diverses). Le but est de démontrer que les prairies et les animaux (bovins, ovins, caprins, volailles) peuvent bénéficier de tous les avantages induits par la structure en termes de réduction des stress abiotiques (thermique, hydrique, gel) qui sont autant de facteurs limitant leur bien-être et leur productivité. Au terme des **3 années d'études**, les résultats obtenus nous permettront de proposer un panel de mélanges multi-espèces à implanter afin de favoriser les prairies sous les conditions d'ombrage partiel généré. Les effets de la structure pilote sur le bien-être et les performances zootechniques seront ainsi finement évalués.

L'intégralité des données générées et leur analyse mécanistique permettra d'établir une base de connaissances sur :

- Les mélanges multi-espèces adaptés à la conduite sous une structure agrivoltaïque,
- Les préconisations de choix variétal selon les zones géoclimatiques,
- Le gain espéré en rendement fourrager,
- Le gain espéré de nombre de jours-pâturage,
- Le maintien ou l'amélioration de la production et du bien-être des animaux.

Les données obtenues tout au long de ce projet sur le différentiel climatique induit par la structure permettront d'adapter au mieux l'itinéraire cultural et la conduite d'élevage sous la structure photovoltaïque et donc d'apporter un appui agronomique aux agriculteurs et aux éleveurs. Elles s'inscriront dans la continuité des travaux menés par TSE sur les démonstrateurs « élevages » de la Canopée Agricole et de l'Ombrière d'Elevage. Elles seront à disposition des coopératives, éleveurs et instituts techniques afin d'enrichir leurs propres bases, et d'intégrer cet outil « ombrière » dans les innovations proposées afin d'améliorer les conditions d'élevage des animaux. Les résultats feront l'objet de publications dans la presse technique et scientifique pour accompagner le développement futur de l'agrivoltaïsme.

5.2. SURFACE EXPERIMENTALE

5.2.1. PLAN D'EXPLOITATION

L'implantation de l'ombrière d'élevage est prévue sur des parcelles entourant l'exploitation ainsi que la parcelle témoin. Les parcelles test et témoin sont toutes les deux des prairies naturelles et s'étendent respectivement sur 8 et 7 hectares.

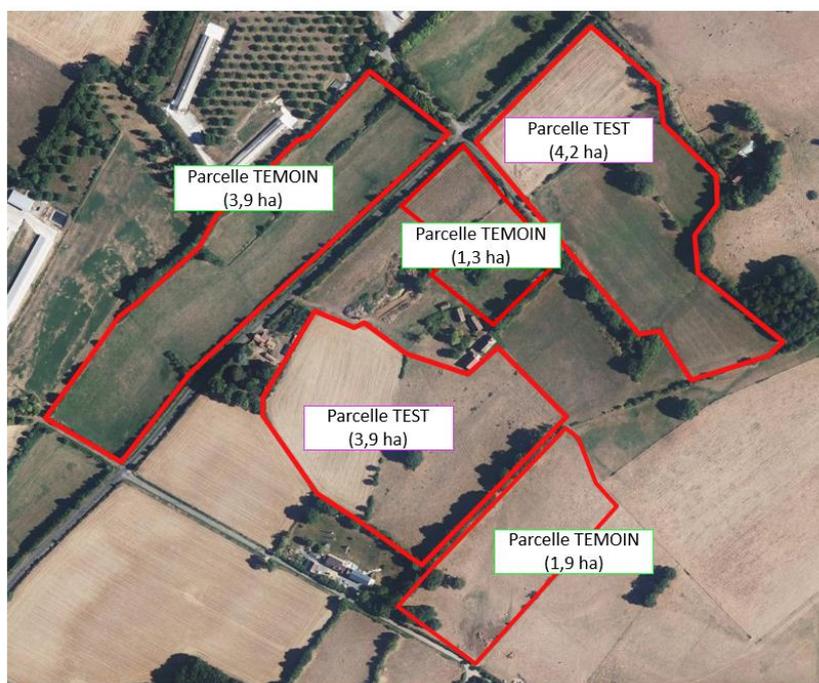


Figure 9. Plan de l'exploitation et des parcelles prévues pour l'implantation de l'ombrière d'élevage et de la parcelle témoin.

5.2.2. AMENAGEMENTS POUR L'EXPERIMENTATION

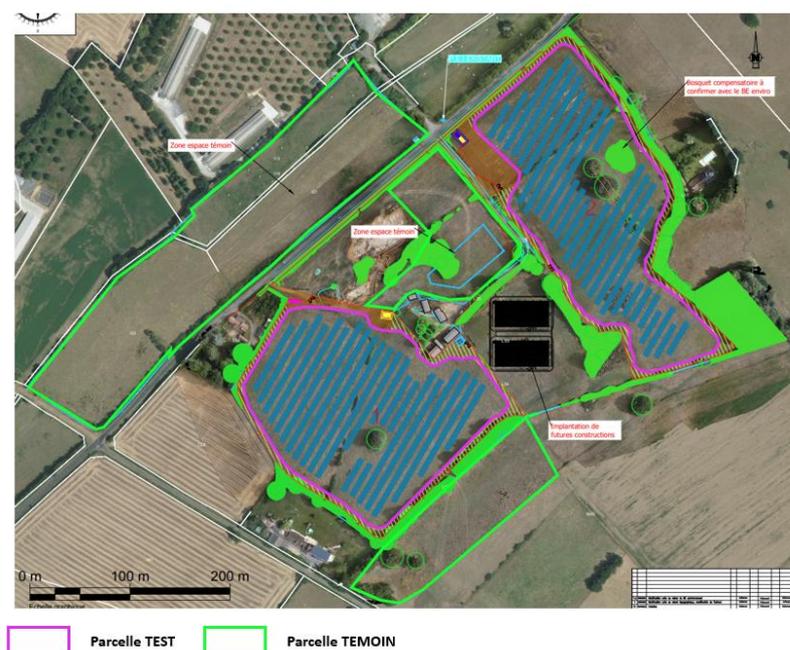


Figure 10. Design de la centrale agrivoltaïque

Actuellement, l'éleveur laisse pâturer de mars à novembre, sur la totalité de la surface utilisée pour le projet, deux lots de vaches allaitantes et 2 taureaux.

Dans le cadre du projet expérimental, 2 lots de vaches allaitantes seront constitués et mis au pâturage sur les parcelles test et témoin : un lot de 30 vaches allaitantes TEST sous la centrale agrivoltaïque et un lot de 30 vaches allaitantes TEMOIN sur la parcelle témoin. Afin d'optimiser la valorisation de la prairie par les bovins et pour permettre une limitation du tracking, du pâturage tournant sera mis en place. Le nombre de paddocks constitués et leur surface est dépendant de 3 facteurs :

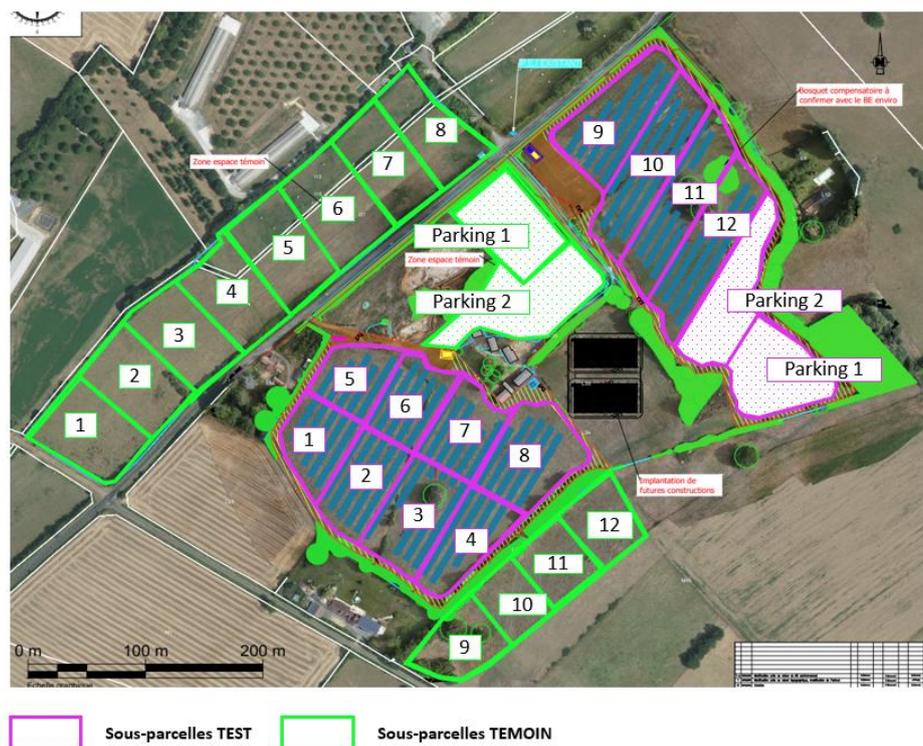
- La capacité d'ingestion des animaux ;
- Du rendement fourrager de la prairie ;
- Du temps de pâturage / paddock envisageable.

Pour le projet, nous avons les facteurs suivants :

- **Capacité d'ingestion d'un lot de 30 vaches allaitantes** (type rouge des prés) : $14 \text{ kg MS} / \text{jour} \times 30 = 420 \text{ kg MS} / \text{jour}$;
- **Rendement fourrager de la prairie : estimation à 6 tMS/ha ;**
- **Temps de pâturage / paddock : 3 jours maximum.**

Nous prévoyons donc de découper les parcelles test et témoin en 12 paddocks de 0,5 hectare chacun et de suivre le planning de pâturage suivant :

- Déprimage à partir de fin février : 36 jours = 3 jours / paddocks ;
- Pâturage mars – mai : 28 – 30 jours = 2 ou 3 jours / paddocks (selon l'offre fourragère) ;
- Pâturage fin mai – juillet : 3 à 4 jours / paddocks ;
- Parking en été : si stade de 3-4 feuille non atteint, mis en défens des paddocks 1 à 10 et utilisation de 2 autres parcelles « parking » pour les 2 lots,
- Reprise du pâturage à l'automne : 36 jours = 3 jours / paddocks.



0.

Figure 11. Principe de découpage de sous-parcelles dans le cadre de la mise en place de pâturage tournant dynamique

5.2.3. ADAPTATION DU TRACKING

Afin de permettre aux animaux de pâturer aisément, la rotation des panneaux sera limitée à 1,80m au-dessus du sol pour laisser passer les animaux librement. Néanmoins, pour conserver l'équilibre entre la production animale et la production d'énergie, la mise en place de pâturage tournant permettra de mettre en œuvre un pilotage du tracking. En effet, les panneaux qui se trouveront dans la sous-parcelle où les animaux pâturent seront limités à 1,80 m au-dessus du sol tandis que le reste des panneaux (où les animaux n'iront pas) ne seront pas limités et pourront descendre jusqu'à 0,5m au-dessus du sol. Ce pilotage sera géré en concertation entre l'éleveur et l'équipe en charge de l'exploitation de l'ombrière.

5.2.4. ECHANTILLON

Un **lot test** (i.e. pâturant sous structure agrivoltaïque) et un **lot contrôle** (i.e. pâturant sur la parcelle témoin sans structure) de vaches allaitantes seront constitués selon plusieurs critères pour garantir une homogénéité dans chaque échantillon :

- En âge ;
- En poids ;
- En race ;
- En nombre de vêlage/vache ;
- En taux de prolificité.

La taille des lots est également définie selon le chargement souhaité sur les parcelles test et contrôle et si un pâturage tournant est mis en place ou non.

Lorsque des vaches allaitantes seront ajoutées au cours de l'expérimentation, un équilibre entre les deux groupes sera conservé. Les animaux seront équipés d'un podomètre avec un numéro unique RFID qui permettra d'avoir un suivi individuel.

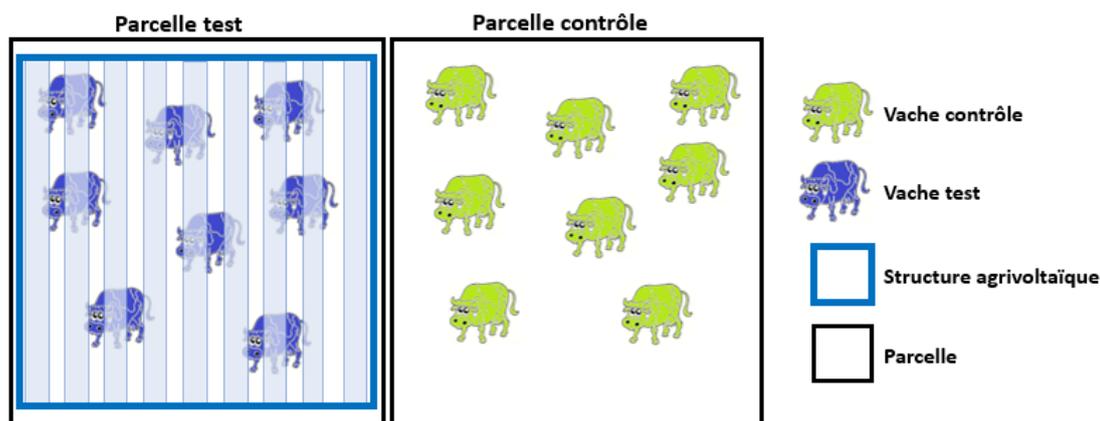


Figure 12. Schéma du design expérimental

Dans le cadre des analyses agronomiques pour étudier le comportement des mélanges prairiaux ensemencés, des zones de prélèvements appelées « placettes » dans la suite de ce guide sont tirées de manière aléatoire sur les parcelles test et contrôle. Nous souhaitons observer le comportement de la prairie pâturées et non pâturées pour 2 types de mélanges prairiaux. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence 4 modalités qui seront communes aux parcelles test et contrôle :

- **Modalité 1** : Prairie pâturée ombragée ;
- **Modalité 2** : Prairie pâturée sans ombrage ;
- **Modalité 3** : Prairie non pâturée ombragée ;
- **Modalité 4** : Prairie non pâturée sans ombrage.

Dans chaque modalité, 2 placettes seront tirées aléatoirement dans un souci de répétabilité de nos échantillons. Pour les placettes « ombragée » dans la parcelle test, 3 zones d'ombrage seront étudiées : sous-panneau, à l'arête d'un panneau et hors panneau. Cela constituera des blocs de 3 placettes. Le tableau ci-dessous permet de synthétiser le nombre de placettes présentes par parcelle test ou contrôle et par modalité, et la carte qui suit identifie leur position géographique après tirage aléatoire.

	Parcelle Test	Parcelle Contrôle
Modalité 1	9	/
Modalité 2	/	3
Modalité 3	9	/
Modalité 4	/	3
Total de placettes	24	6

5.3. MATERIELS ET METHODES

5.3.1. MATERIEL

La mise en place de l'expérimentation nécessite de constituer 2 lots d'animaux. Afin de les identifier et de pouvoir les diriger vers les bonnes parcelles, ceux-ci seront équipés des podomètres accrochés à un postérieur. Ces podomètres permettront d'associer chaque animal à un numéro d'individus et d'être reconnu grâce à un code RFID par différents détecteurs.

En plus de permettre l'identification des bovins, les podomètres permettent d'avoir accès aux informations, liées au bien-être, suivantes :

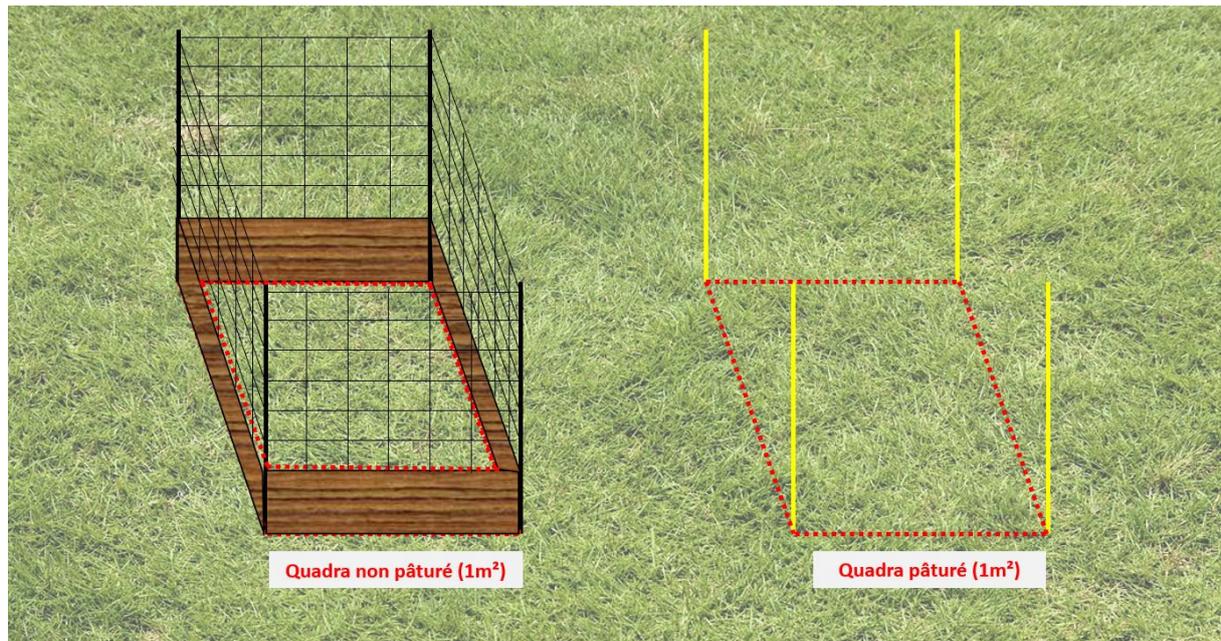
- La détection des chaleurs,
- Les alertes pour le vêlage,
- Le temps de repos/rumination,
- Le temps de couchage,
- Le nombre de pas,
- La mesure des boiteries.



Figure 13. Podomètre AfiTag pour postérieur de bovins.

Pour réaliser le suivi agronomique des prairies, deux dispositifs seront mis en place :

- Des piquets colorés (types piquets en fibre de verre) pour définir les placettes pâturées par les bovins dans les parcelles test et contrôle ;
- Des piquets, un cadre en bois de 15 cm de hauteur et un grillage pour définir des placettes non pâturées dit « en défens » dans les parcelles test et contrôle.



Afin d'évaluer les conditions météorologiques sous et hors structure agrivoltaïque, les capteurs suivants seront installés :



Figure 14. Capteur PAR (Weenat)

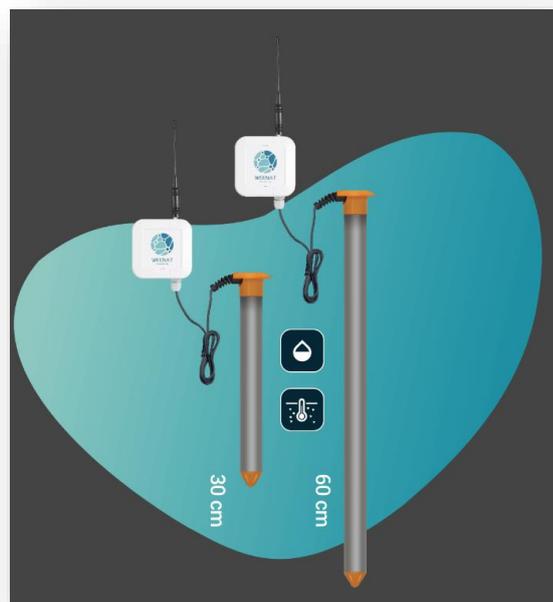


Figure 15. Sonde capacitive de 0 à 60 cm dans le sol (Weenat)



Figure 16. Anémomètre (Weenat)



Figure 17. Station météorologique (Weenat)

5.3.2. PARAMETRES AGRONOMIQUES : PRAIRIES MULTI-ESPECES

Le suivi des prairies permet d'apporter des données précieuses sur la réalisation du projet. La collecte régulière de données permet de suivre les rendements, la valeur alimentaire et la composition floristique des prairies au cours des saisons. Notre objectif est d'identifier l'impact de la structure agrivoltaïque sur des prairies multi-espèces ensemencées et pâturées par des vaches laitières.

5.3.2.1. CHOIX DU MELANGE PRAIRIAL

Les avantages agronomiques et zootechniques des associations simples entre une graminée et une légumineuse sont connus, mais ne répondent plus à tous les enjeux actuels. Les prairies multi-espèces spécifiques ont de nombreuses potentialités et intérêts en systèmes de production de lait ou de viande basés sur le pâturage, notamment dans un contexte d'aléas climatiques croissants. Elles permettent généralement d'accroître la production primaire d'herbe, de mieux répartir la production entre saisons et entre années, voire d'améliorer la valeur nutritive de la prairie, l'ingestion et la production animale au moins à certaines périodes de l'année. Toutefois, la quasi-totalité des études en France ont été réalisées à partir de combinaison de plusieurs graminées et de plusieurs légumineuses, souvent en système de fauche et peu au pâturage sur des durées longues. L'objectif de notre étude est donc de déterminer la capacité de prairies multi-espèces à se développer sous une structure agrivoltaïque avec des animaux avec différents besoins alimentaires.

CRITERES DE SELECTION DES ESPECES

Les mélanges multi-espèces qui seront testés intégreront au moins 5 espèces dont des graminées, des légumineuses et des diverses. Le choix des mélanges multi-espèces est réfléchi avec l'Institut de l'Élevage en fonction du contexte pédoclimatique (structure, qualité et niveau de salissement du sol), de la date de semis

possible à l'issue des travaux (mars ou mi-septembre) et au regard des pratiques locales discutées avec l'éleveur. La composition des mélanges testée tient compte des modes d'exploitation prévus (pâturage et/ou fauche), d'une pérennité longue (rusticité du couvert et capacité de vieillissement), mais aussi de l'ombrage tournant projeté par les panneaux et son effet sur la réduction des stress thermique et hydrique.

Les espèces sont choisies à l'aide d'un tableau décisionnel et selon 3 critères :

- La fonction production ;
- La fonction qualité ;
- La fonction engazonnement.

Dans le but de guider le choix du mélange prairial, une analyse agronomique est réalisée sur les surfaces test et contrôle du projet afin d'avoir une idée de l'état du sol.

DEFINITION DE LA PERIODE D'IMPLANTATION

Enfin, selon le planning de construction, nous devons adapter la composition des mélanges selon la date de semis possible. Deux critères rentrent en compte pour avoir les conditions les plus favorables pour le semis d'une prairie :

- Une humidité du sol suffisante,
- Une température douce.

Ces conditions permettent une levée rapide et homogène des semences et un bon développement des jeunes plantules. Cependant, elles se rencontrent uniquement lors de deux périodes de l'année : au début du printemps et en fin d'été.

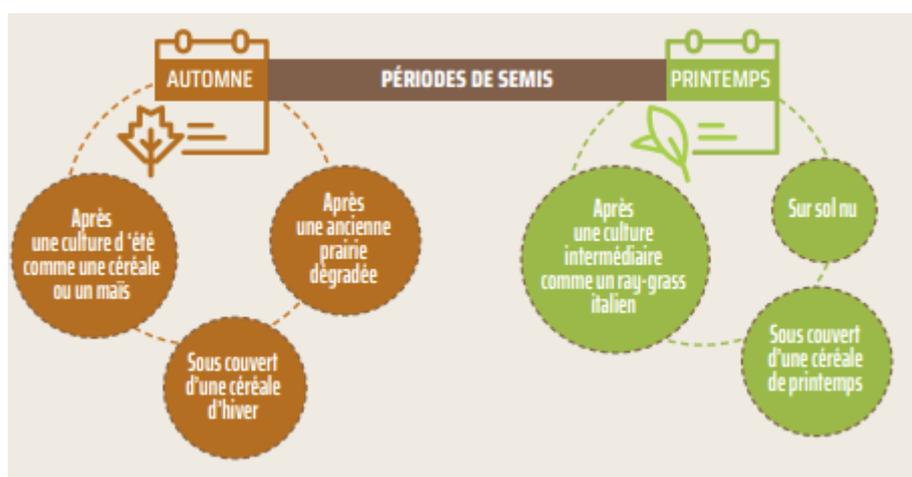


Figure 18. Périodes de semis des prairies selon les précédents culturaux. Source : Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages.

Quelques points de vigilance sont à inclure dans la réflexion des mélanges selon les dates de semis prévus :

- Pour les semis de fin d'hiver et de printemps : Ils sont intéressants pour des re-semis de prairies permanentes, derrière des précédents récoltés à l'automne et en zone de montagne (altitude > 500m). Toutefois, ils présentent l'inconvénient de réduire de moitié la production l'année du semis. En outre, ils décalent la production d'herbe. Au printemps, les semis doivent être effectués suffisamment tôt pour qu'en cas de sécheresse précoce les jeunes plantules soient déjà bien implantées. Il faut cependant éviter de semer trop tôt pour éviter les risques de destruction par le gel.
- Pour les semis de fin d'été et d'automne : Ils présentent l'avantage de permettre une production importante dès le printemps suivant. Ils sont en revanche déconseillés dans les zones de montagne en

raison des risques de gel précoce. La fin de l'été est une période favorable notamment pour les parcelles qui se ressient tardivement au printemps. Il faut semer le plus tôt possible dès les premières pluies, après la récolte du précédent. Le risque est alors de s'exposer à une période de sec provoquant de la mortalité chez les jeunes plantules.

Les dates de semis doivent donc être adaptées afin que les espèces soient suffisamment bien implantées pour résister aux stress climatiques.

Pour cela, les graminées doivent avoir atteint le stade 4-5 feuilles et les légumineuses le stade 2-3 feuilles trifoliées, avant l'apparition d'un stress hydrique pour les semis de printemps ou avant les premières gelées pour les semis de fin d'été. Par ailleurs, on considère qu'il faut 600 degrés-jour après semis pour qu'une légumineuse atteigne le stade 2-3 feuilles trifoliées et ne plus craindre le gel.

5.3.2.2. EVOLUTION DE LA COMPOSITION FLORISTIQUE

Afin d'évaluer la **composition floristique des mélanges**, des quadras de 1m² seront positionnés sur les parcelles test et contrôles de manière aléatoire.

A la suite d'un ensemencement d'une prairie, sa composition au cours du temps évolue selon les pratiques (i.e. fauche, pâturage ou mixte) et/ou le milieu (séchant, hydromorphe, basique, acide, stress rencontrés). La réalisation de relevés floristiques permet de déterminer la contribution relative des principales espèces à la biomasse, de suivre la pérennité des espèces implantées, l'évolution des équilibres et de capitaliser les observations pour les situations futures (i.e. impact du pâturage ou d'un ombrage tournant sur la flore).

Ces relevés floristiques s'effectuent en identifiant de visu les principales espèces présentes sur la prairie et en leur attribuant une proportion au regard de la parcelle.

5.3.2.3. PRODUCTIVITE FOURRAGERE

La mise en place d'une structure agrivoltaïque au-dessus du couvert prairial peut avoir un impact sur la productivité de celle-ci que nous souhaitons caractériser. En effet, nous voulons observer au cours des années de quelle manière la productivité fourragère de la prairie évolue.

La hauteur d'herbe sera donc régulièrement mesurée, soit 5 à 8 fois par an, sur tous les quadras des 8 modalités à l'aide d'un herbomètre. Puis, des prélèvements d'herbe seront réalisés et envoyés en laboratoire pour les peser avant et après séchage afin d'estimer :

- **La production fourragère de la prairie par cycle de pâturage** : Quantité d'herbe sèche disponible pour la pâture ou pour la fauche pour un cycle d'exploitation donné et est obtenue en moyennant la quantité d'herbe récoltée dans les quadras. Elle s'exprime en tMS/ha,
- **La production fourragère annuelle de la prairie** : Cumul annuel des productions fourragères obtenues à chaque cycle de pâturage. Cette quantité annuelle offre un aperçu de la capacité de production de la prairie et permet d'étudier son évolution année après année. Elle s'exprime en tMS/ha.
- **La teneur en matière sèche de l'herbe**, correspondant au ratio :

$$\text{Teneur en matière sèche} = \frac{\text{Poids d'herbe sèche}}{\text{Poids d'herbe fraîche}}$$

Cette valeur donne des indications sur le stade physiologique des plantes et en particulier des graminées, sur les conditions climatiques (sécheresse) et sur la qualité nutritionnelle de l'herbe.

5.3.2.4. QUALITE DU FOURRAGE PRODUIT

L'estimation de la valeur alimentaire d'un fourrage nécessite d'en analyser d'abord la composition chimique. Les mêmes échantillons qui auront été pesés seront ensuite broyés à la grille de 1mm puis analysés avec un dosage infrarouge. Il permet de déterminer :

- **La teneur en matières minérales (MM)**, qui est obtenue après incinération complète de l'échantillon de fourrage à 550 °C. Cette détermination permet de calculer par différence la teneur en matière organique du fourrage ;
- **La teneur en matière organique (MO)**, calculée :

$$\text{Matière Organique (MO en } g.kg^{-1} \text{ MS)} = 1000 - \text{MM (MM en } g.kg^{-1} \text{ MS)} ;$$

- **La teneur en cellulose brute (CB)** correspondant à la teneur en parois végétales. Plus cette teneur est élevée moins le fourrage est digestible ;
- **La teneur en Neutral Detergent Fiber (NDF)** correspondant à la fibre totale. Plus la teneur en NDF est élevée, plus l'aliment est fibreux, et moins il sera consommé par l'animal. La fibrosité dépend aussi du fourrage lui-même (longueur des fibres, taille des particules, etc.) ;
- **La teneur en Acid Detergent Fiber (ADF)** qui correspond à la quantité de cellulose et de lignine contenue dans le fourrage. Ces deux éléments constituent les parois végétales peu digestibles. Plus cette teneur est élevée, moins les fibres sont digestibles et énergétiques.
- **La teneur en lignine (ADL)** correspond à la fraction indigestible par les animaux du fourrage. Plus cette teneur est importante, moins le fourrage est digestible et valorisable par les animaux.
- **La teneur en Matière Azotée Totale (MAT)** qui correspond à la quantité de protéines contenues dans le fourrage. Cependant, cette valeur ne tient pas compte de la digestibilité et de la nature des acides aminés qui composent ces protéines.

Ces premières données permettront ensuite de calculer la valeur alimentaire du fourrage à l'aide des équations de l'INRAE (2018) :

- **La digestibilité de la matière organique (dMO)** qui caractérise la proportion du fourrage digestible par les ruminants et est exprimée en % ;
- **La digestibilité enzymatique pepsine-cellulase (DCS)** qui caractérise la digestibilité de la matière organique des fourrages pour les ruminants ;
- **Les unités Fourragères Viande (UFV)** qui sont calculées à partir des teneurs en MAT, en MO et en parois végétales, ainsi qu'à partir de la digestibilité de la MO. Cette valeur correspond à l'énergie directement disponible apportée par 1 kg de matière sèche ;
- **Les Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI)** qui correspondent à la quantité de protéines réellement digestibles qui arrivent dans l'intestin grêle. Elles donnent ainsi une idée de la qualité nutritionnelle des protéines présentes dans l'herbe. La valeur PDI la plus faible constitue un facteur limitant et sera donc prise en compte pour estimer la quantité de protéines digestibles ;
- **Les Protéines Digestibles dans l'intestin d'origine Alimentaire (PDIA) ;**
- **La balance protéique (BPR)** qui permet de quantifier l'azote soluble apporté par les aliments aux microbes du rumen. Si la ration a une BPR négative : elle n'apporte pas assez d'azote soluble aux microbes, la digestion se fait mal. Si la ration a une BPR positive : les microbes ont trop d'azote soluble, les pertes urinaires sont importantes ;
- **L'unité d'encombrement (UE - UEL)** reflétant la quantité de fourrage que l'animal va ingérer volontairement. Un fourrage à forte valeur d'encombrement séjournera plus longtemps dans le rumen, donc l'animal en consommera moins. On parle d'UEL pour les vaches laitières ;
- **Le rapport PDI/UFL** qui permet d'évaluer si l'alimentation est équilibrée ou bien nécessite un apport en énergie et en protéines.

Enfin, il est à savoir que tous les tissus animaux et les aliments contiennent des éléments inorganiques, ou minéraux, en quantités variables. Parmi ces éléments, certains peuvent être considérés comme essentiels pour maintenir l'intégrité fonctionnelle et structurelle des tissus, et pour assurer une croissance optimale, la santé et la productivité des animaux.

5.3.3. PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX

L'installation d'une structure agrivoltaïque avec un ombrage partiel tournant peut être à l'origine de la création d'un micro-climat en dessous des panneaux. Plusieurs hypothèses, en cours de validation avec d'autres projets agrivoltaïques, sont émises sur :

- La diminution des amplitudes thermique,
- L'augmentation de la disponibilité de l'eau dans le sol,
- La diminution du vent grâce à un potentiel effet brise-vent de la structure,
- Une diminution du stress thermique et hydrique des végétaux et des animaux, etc.

Pour caractériser ce climat particulier et le comparer à celui de la parcelle contrôle, les paramètres suivants seront relevés de manière continue :

- A l'aide de stations météorologiques : les précipitations (en mm), l'humidité relative (en %), la température (en °C) ;
- A l'aide de capteurs PAR : le rayonnement photosynthétique actif ;
- A l'aide de sondes capacitatives : la température (en °C) et l'humidité (en %) du sol entre 0 et 60 cm de profondeur ;
- A l'aide d'anémomètre : la vitesse du vent (en m.s⁻¹) ;
- A l'aide d'une sonde Globe Noir : la température Globe Noir qui permet de calculer le Heat Load Index pour estimer le ressenti thermique des animaux.

5.3.4. BIEN-ETRE ANIMAL

Il est généralement admis dans la littérature scientifique que les indicateurs comportementaux sont les plus précoces, c'est-à-dire qu'ils sont les premiers à varier face à une contrainte perçue par l'animal. Ce seront donc des indicateurs visibles le plus précocement par un évaluateur. Les indicateurs physiologiques sont également sensibles et précoces, et souvent concomitants des indicateurs comportementaux. Toutefois, certaines espèces qui sont des proies à l'état naturel ont tendance à moins exprimer leur comportement et donc à avoir des réactions peu visibles afin de minimiser leur état de faiblesse par rapport au prédateur, alors même que les indicateurs physiologiques sont largement modifiés. Dans ce cas, les indicateurs comportementaux ne seront peut-être pas facilement perceptibles, et seuls les indicateurs physiologiques seront utilisables précocement. Les indicateurs sanitaires et de production constituent, dans la majorité des cas, des indicateurs moins sensibles et moins rapidement ou moins facilement modifiés face à une contrainte. Cette différence de précocité implique différents points :

- Les indicateurs comportementaux doivent être privilégiés pour **détecter précocement des dégradations du bien-être** des animaux avant que celles-ci ne deviennent trop graves. Ils sont aussi à favoriser lors de la mise en place d'actions correctives afin d'évaluer rapidement leur efficacité ;
- Il faut être conscient que **l'absence de modifications des indicateurs de production ne reflète pas nécessairement l'absence d'une contrainte subie par l'animal**. En effet, cette contrainte peut se répercuter sur le comportement ou la physiologie de l'animal sans affecter pour autant sa production. De ce fait, une bonne production n'est pas toujours synonyme de bien-être optimal pour les animaux ;
- **L'évaluation globale du bien-être des animaux doit utiliser des indicateurs de différents types**. C'est uniquement lorsqu'ils sont non dégradés et concordants que l'on peut garantir un bien-être véritablement respecté.

Le bien-être est donc un concept multidimensionnel qui nécessite une évaluation multicritère. Ainsi, pour nos études, nous nous appuyons sur l'outil d'évaluation multicritère du bien-être animal qui a été conçu par deux programmes de recherche européens : le programme Welfare quality de 2004 à 2009 et le programme AWIN de

2011 à 2014. Les mesures détaillées ci-dessous permettront d'évaluer le bien-être des vaches laitières qui seront exposées à la structure agrivoltaïque dans leur environnement et de le comparer à celui des vaches laitières qui ne seront pas exposées.

5.3.4.1. COMPORTEMENT

Face à une contrainte, quelle qu'elle soit, l'animal modifie et adapte son comportement pour se soustraire à cette contrainte ou au moins l'atténuer. Par exemple, si un animal perçoit comme négatif le fait qu'un humain ou un congénère entre dans sa distance de fuite (i.e. son espace individuel), il modifie son comportement soit par la fuite, soit par l'attaque pour faire sortir l'humain ou le congénère de cet espace. Il existe principalement deux groupes d'indicateurs comportementaux : les modifications de l'activité de l'animal et les modifications de réactivité.

Ces modifications peuvent concerner les comportements normaux, c'est-à-dire faisant partie du répertoire comportemental de l'animal, dont la fréquence et/ou l'amplitude est exacerbée ou réduite, ou concerner **l'apparition de comportements anormaux**, c'est-à-dire de comportement ne faisant pas partie du répertoire comportemental). Ces comportements, que l'on définit comme agonistiques, seront évalués par la fréquence d'apparition de coup de tête, de chasse d'un congénère par expression faciale ou impliquant un contact physique ou d'affrontements. En complément de l'observation de ces comportements anormaux, nous souhaitons observer la fréquence **d'apparition des comportements cohésifs** et plus finement **l'état émotionnel** des vaches allaitantes. La méthode QBA, ou Qualitative Behaviour Assessment permet d'évaluer la qualité des interactions des animaux entre congénères et avec leur environnement à partir de l'observation du « langage corporel ».

Chaque animal effectue un certain nombre d'activités régulières (alimentation, repos, interactions sociales, exploration, déplacement...) qui font partie de son répertoire comportemental. La répartition de ces activités au cours d'une journée (i.e. 24h) constitue ce que l'on appelle le « **budget temps** » de l'animal et il est généralement similaire entre les animaux de même race et de même âge.

La répartition de ces activités, leur fréquence, leur durée moyenne ou leur durée totale au cours de la journée peuvent cependant être modifiées par une contrainte subie et perçue par l'animal. Ainsi, si l'animal ne perçoit pas comme satisfaisant le confort de l'endroit où il se couche (disposition, place, surface), il diminuera probablement le temps total passé en position couchée, ou diminuera la durée moyenne des séquences qu'il passe couché par rapport à son budget temps normal. Ce budget temps est complexe à quantifier car le temps d'observation nécessaire est très long. Ainsi, nous choisissons d'observer le budget-temps des bovins uniquement sur analyse de vidéos filmées par des caméras installées sur la parcelle test et témoin.

5.3.4.2. ALIMENTATION

Dans le budget temps des vaches allaitantes, presque la moitié de leur temps est consacrée à l'alimentation, la rumination et l'abreuvement. Ainsi, si une contrainte s'applique à l'une de ces activités, nous pourrions observer une dégradation de l'état de l'animal.

Deux critères majeurs seront évalués : l'absence de faim et l'absence de soif prolongées.

Pour vérifier que les vaches allaitantes sont nourries ou se nourrissent (i.e. un stress peut amener l'animal à ne plus se nourrir), nous réalisons une notation régulière de **l'état corporel** (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) des vaches allaitantes des lots test et contrôle. A l'aide du planning de pâturage de l'éleveur, nous pourrions estimer le **nombre de jour-pâturage par lot**. Enfin, pour compléter, nous mesurerons la quantité de fourrages verts distribués en plus de la consommation de la prairie pour connaître les quantités exactes d'aliment assimilés.

L'abreuvement des animaux, ne concernant que 30 minutes dans leur journée est pourtant vital pour leur santé. Nous allons donc, à l'aide de compteurs d'eau installés sur chaque abreuvoir, mesurer la **consommation journalière d'eau** par lot de vaches laitières et une notation de **l'état de propreté des points d'eau** sera effectuée lors de ce même relevé (cf. [Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)).

5.3.4.3. CONFORT

Nous évoquions précédemment la capacité des animaux à adapter leur budget temps en fonction des contraintes qu'ils pouvaient rencontrer au cours de leur journée, dans leur environnement. La fréquentation d'une zone pour la rumination ou se coucher sont des indicateurs sur leur confort. Nous souhaitons observer 3 paramètres permettant de caractériser le confort des vaches laitières dans l'environnement où elles se trouvent :

- La facilité de mouvement,
- Le confort de couchage,
- Le confort thermique.

Les mouvements des vaches allaitantes seront observés à l'aide des caméras installées en direction du parc photovoltaïques et des surfaces témoins. Les séquences enregistrées permettront d'évaluer la bonne circulation et utilisation des espaces par les vaches. Elles permettront également d'évaluer la quantité d'animaux couchées. En effet, le confort de couchage des vaches est évalué grâce à deux données. Tout d'abord le **dénombrement des vaches couchées** observées sur des séquences captées par les caméras installées en direction de la surface test ou de la surface contrôle. La mesure du **temps mis pour se coucher** sera réalisé sur ces mêmes séquences vidéo. Et, dans le but d'affiner l'apport bénéfique de l'ombrage de la canopée, nous comptons également pour le lot test, le **nombre de vaches couchées à l'ombre d'un panneau photovoltaïque**. Les podomètres individuels recenseront également le **temps qu'elles ont passé couchées** au cours d'une journée. Enfin, pour vérifier que les milieux où les vaches se déplacent et se couchent sont de qualité, nous notons également la propreté des vaches.

Les vaches allaitantes sont très sensibles à l'augmentation de la température et de l'humidité dans leur environnement. Elles peuvent rapidement se retrouver en stress thermique et cela peut impacter négativement leur bien-être, leur état de santé et par extension leur performances zootechniques (production musculaire et reproduction). A l'aide des capteurs météorologiques disposés sur le parc photovoltaïque et sur la surface contrôle, nous estimerons, avec le calcul de deux index, le stress thermique vécu par les animaux :

- Temperature Humidity Index ou THI,
- Heat Load Index ou HLI.

5.3.4.4. SANTE

L'état de santé de l'animal fait partie des critères à évaluer pour garantir son bien-être. Si la santé est dégradée, de facto le bien-être de l'animal l'est aussi. Mais l'état de santé constitue également un indicateur du bien-être global de l'animal : une dégradation du bien-être peut causer une détérioration de la santé de l'animal, même si ce n'est pas le critère de santé qui est directement impacté. En effet, face à une contrainte, le stress de l'animal entraîne notamment une diminution des défenses immunitaires. L'animal est alors plus sensible aux agents pathogènes opportunistes, qui ne déclenchent normalement pas de maladies sur un animal ayant une immunité suffisante. Les signes cliniques qui apparaissent sont alors des indicateurs de la maladie et indirectement du bien-être de l'animal. Outre l'apparition de symptômes évocateurs selon la maladie en cause, l'augmentation de la morbidité (i.e. pourcentage d'animaux malades dans un groupe) ou de la mortalité indique la présence d'une contrainte.

Des lésions, des gonflements, des irritations sur la peau de l'animal révèlent également une inadéquation entre l'animal et son environnement (physique ou social). Ainsi, chez les bovins, des lésions au niveau des jarrets

peuvent dénoter une litière inconfortable pour le couchage, et des lésions au niveau du garrot une inadaptation du cornadis à la taille des animaux.

Les indicateurs sanitaires sont ainsi particulièrement importants à surveiller. En effet, dès qu'une dégradation de la santé de l'animal est avérée, le bien-être de celui-ci se détériore de plus en plus. Le mauvais état sanitaire peut entraîner des modifications comportementales qui vont accentuer la dégradation du bien-être. Ainsi, un animal malade va restreindre son activité, moins se déplacer ou moins s'alimenter, ce qui entraînera des conséquences négatives sur son bien-être. De même, des lésions peuvent entraîner des douleurs qui à leur tour peuvent causer une modification de comportement. Par exemple, un couchage inconfortable engendre des lésions chez l'animal. Ce dernier va adopter une position qui soulage la douleur, ce qui pourra causer d'autres lésions, ou bien il va hésiter à ce qui coucher ce qui entraînera d'autres problèmes.

Enfin, une dégradation de l'état de santé peut aboutir à des difficultés d'adaptation de l'animal à son environnement physique et social. Un animal malade ou blessé pourra par exemple exprimer des difficultés dans les relations sociales et être plus souvent que d'habitude confronté à des compétitions aux résultats négatifs pour lui. Les indicateurs sanitaires doivent donc être non seulement vérifiés/inspectés précocement, mais une solution doit être trouvée au plus vite pour éviter que l'animal entre dans un cercle vicieux de dégradations du bien-être.

Ainsi, l'évaluation des indicateurs suivants, nous permettra de suivre en continu l'état de santé des vaches laitières des lots test et contrôle et d'identifier rapidement si une dégradation pourrait être lié ou non à la structure agrivoltaïque installé :

- Boiteries,
- Altérations tégumentaires,
- Toux,
- Gênes respiratoires,
- Ecoulement nasal,
- Ecoulement oculaire,
- Diarrhée,
- Rumen gonflé,
- Mortalité.

L'évaluation de ces indicateurs permettra de faire évoluer notre structure et d'installer des protections si cela s'avère nécessaire.

5.3.5. PERFORMANCES ZOOTECHNIQUES

La réaction de stress que l'animal exprime face à une contrainte est généralement consommatrice d'énergie. De plus, en cas de stress, l'animal va souvent modifier son comportement, par exemple en diminuant son temps d'alimentation ou en restant prostré à l'écart des congénères. Ces deux facteurs conjugués, baisse de l'activité et consommation d'énergie de l'organisme, peuvent expliquer qu'une contrainte soit à l'origine d'une diminution de production.

Chez les vaches allaitantes ou à l'engraissement, cette diminution peut affecter la production de lait, mais aussi la croissance des jeunes animaux ou encore la reproduction. Pour une vache allaitante, changer d'éleveur ou d'environnement par exemple, est source d'un stress qui peut entraîner une diminution de la vigueur musculaire. Nous supposons effectivement que l'installation d'une structure agrivoltaïque dans l'environnement puisse être la cause d'un stress que nous souhaitons évaluer et quantifier.

5.3.5.1. PRODUCTION DE VIANDE

Afin d'évaluer l'engraissement des vaches des lots test et contrôle, une mesure du Gain Moyen Quotidien pourra être effectuée à l'entrée et à la sortie du pâturage des parcelles test et contrôle, sous condition que l'exploitant soit déjà familiarisé avec ces pratiques. La balance pourra être financée par TSE, si cela est nécessaire.

Les mesures de performances d'engraissement seront ensuite relevées à l'abattoir et comparés selon la provenance des animaux (lot test ou contrôle) :

- **Poids vif** à la sortie de la ferme, avant transport,
- **Production brute** : Nombre de kilogrammes vifs de viande produits/UGB/an,
- **Rendement commercial** : Poids fiscal de la carcasse froide/poids vif à jeun),
- **Note d'état d'engraissement**.

5.3.5.2. REPRODUCTION

Dans le but d'évaluer l'impact de la structure agrivoltaïque sur les performances reproductives des vaches de chaque lot, les informations suivantes seront relevées à partir du registre d'élevage tenu à jour régulièrement par l'éleveur :

- Nombre de vaches,
- Nombre de vaches gestantes,
- Nombre de vaches ayant vêlé,
- Nombre de vaches mises à la reproduction,
- Nombre total de vaches saillies,
- Nombre de génisses mises à la reproduction,
- Nombre d'avortements,
- Nombre de jours entre le 1^{er} vêlage et le jour de réforme,
- Nombre de veaux nés,
- Nombre de veaux sevrés,
- Nombre de métrites,
- Nombre de vaches réformées.

5.3.5.3. PRODUCTION VIANDE

Afin de suivre les performances d'engraissement des bovins, des pesées régulières seront réalisées. La balance détectera le code RFID d'identification de l'animal et permettra d'enregistrer son poids. L'évolution du Gain Moyen Quotidien des bovins de chaque lot sera observée. Lorsque les bovins seront menés à l'abattoir, nous relèverons leur âge et leur poids vif à la sortie de la ferme.

L'éleveur se chargera de récupérer plusieurs données auprès de l'abattoir pour évaluer les performances d'abattage :

- La production brute (nombre de kg vifs de viande produits/UGB/an),
- Le rendement commercial (Poids fiscal de la carcasse froide/poids vifs à jeun),
- La production de viande autonome (Nombre de kilogrammes vifs produits par la surface fourragère),
- Etat d'engraissement (classe de 1 à 5, note de 3 recherchée : état d'engraissement couvert).

5.3.5.4. REPRODUCTION

Sur la période d'observation, les données du registre d'élevage seront récupérées afin de mesurer les critères de reproduction des vaches tels que les taux de gestation, de fertilité, d'avortement, de fécondité, de renouvellement, de prolificité, l'intervalle vêlage-vêlage, la durée de vie productive et la productivité numérique.

Des données seront également enregistrées sur les veaux, telles que le nombre de naissances, le sexe, le poids à la naissance, le taux de mortalité ainsi que le contrôle de la croissance avec les Poids-Age-Type à 120 jours et à 210 jours.

5.3.6. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

En fonction de leurs sources d'émission, les champs électromagnétiques ont des fréquences variables. Les antennes relais de télécommunication génèrent des champs électromagnétiques hautes fréquences quand les lignes haute tension induisent des champs électromagnétiques basses fréquences. Or, pour une tension donnée, les interactions des champs électromagnétiques avec l'environnement varient considérablement en fonction de leur fréquence. Il convient alors de distinguer les effets directs des champs électromagnétiques et leurs effets indirects.

Les effets directs des champs hautes fréquences sont des effets thermiques, alors que ceux des champs basses fréquences sont des phénomènes d'induction.

Les effets indirects concernent les courants électriques induits qui peuvent créer des courants indésirés, appelés courants parasites, qui se propagent dans les structures métalliques lorsque la mise en terre n'est pas optimale. Ces courants parasites peuvent avoir une origine interne, liée à l'activité de l'élevage, et/ou externe, imputable aux lignes électriques avoisinantes.

S'agissant des effets directs des champs électromagnétiques, aucune étude scientifique n'a établi un lien de causalité direct entre la proximité d'une ligne électrique et la santé des animaux. En outre, toutes les tentatives visant à relier les champs électromagnétiques à des dysfonctionnements du système immunitaire ou au stress physiologique restent infructueuses.

En ce qui concerne les effets indirects, des études sur les modifications comportementales des animaux en réponse à des courants électriques induits concluent à des réponses de stress, modérées à sévères, qui varient selon les espèces. Par ailleurs, les études commanditées par l'ANSES (agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) pour caractériser l'exposition des animaux d'élevage aux champs électromagnétiques ont conclu à des niveaux d'exposition largement en-dessous des valeurs limites d'exposition définies au niveau européen (100 μ T pour le champ magnétique et 5 kV/m pour le champ électrique pour une fréquence de l'électricité de 50 Hz).

Dans le but de tenter de caractériser aussi finement que possible l'exposition des animaux à des effets directs et indirect des champs électromagnétiques, nous réalisons plusieurs mesures qui pourront être comparées entre elles et avec les données de bien-être et de performances zootechniques des bovins.

5.3.6.1. CARTOGRAPHIE DE LA CONDUCTIVITE DU SOL

Issue de la géophysique, la conductivité est une méthode qui exploite les propriétés de conductance ou de résistance électrique du sol pour en mesurer sa variabilité spatiale. La conductance électrique est la capacité d'un corps à laisser passer le courant électrique ; la résistance électrique, celle de limiter le passage du courant électrique. Ces deux grandeurs physiques sont donc similaires, l'une étant l'inverse de l'autre. Il faut savoir que la conductivité du sol dépend de nombreux facteurs. Les 4 principaux sont :

- La teneur en eau du sol : comme la plupart des matériaux géologiques sont de mauvais conducteurs, la conduction des sols est, la plupart du temps, de nature électrolytique, c'est-à-dire due à la présence d'eau. Aussi la conductivité est fortement dépendante de l'humidité du sol ;
- La concentration ionique de la solution du sol : La conductivité sera donc d'autant plus importante que la quantité d'eau est importante et que celle-ci est riche en sels.

- La nature des éléments constitutifs du sol et leur arrangement dans le profil : La conductivité des sols mesurée à la capacité des sols varient dans la large gamme de 30 à 60 mS/m pour les sols argileux, de 10 à 20 mS/m pour les sols de limons et inférieure à 10 mS/m pour les sables. Ces différences de valeurs s'expliquent par leur comportement hydrique, une argile retenant plus d'eau qu'un sable ;
- La température du sol : la conductivité augmente significativement lorsque la température du sol augmente.

Afin de caractériser la conductivité du sol, une cartographie des parcelles test et contrôle sera effectuée par la société BeApi en utilisant une méthode électromagnétique.

La transmission d'un champ électromagnétique dans le sol est fortement corrélée à sa conductivité apparente. Cette technique utilise deux bobines. La première, parcourue par un courant électrique d'une fréquence donnée produit un champ magnétique dit primaire de même fréquence qui induit dans le sol qu'il traverse des courants électriques, eux-mêmes générant à leur tour un champ magnétique secondaire mesuré à l'aide de la seconde bobine. La conductivité apparente du sol (exprimée en millisiemens par m) est calculée à partir du rapport entre la valeur du champ magnétique secondaire et celle du champ magnétique primaire et des caractéristiques de l'appareil de mesure (distance et position des bobines notamment). Ce type de mesure est facile à mettre en œuvre, sans perturbation du sol, ni prélèvement d'échantillon. L'appareil est simplement posé sur le sol ou traîné horizontalement sur un support dédié pour acquérir des mesures en continue. Il n'y a donc pas de problème de contact sol-sonde et la mesure est immédiate.

5.3.6.2. GEOBIOLOGIE DU SITE

La géobiologie est une discipline qui traite des relations entre le vivant d'une part et, d'autre part, l'environnement, les constructions et les modes de vie. L'objectif est de déterminer les zones à éviter parce qu'elles pourraient avoir un impact négatif sur la santé des animaux. Ces impacts négatifs peuvent avoir une origine artificielle (champs électromagnétiques en provenance de lignes de haute tension, d'antennes relais, d'éoliennes, de transformateurs, d'installations électriques dans les élevages, etc.) ou telluriques.

Le diagnostic géobiologique est réalisé en 2 temps :

- D'abord, le géobiologue analyse le lieu en s'intéressant particulièrement aux failles et aux veines d'eau situées à proximité, voire sous les bâtiments d'élevage, et qui peuvent perturber le vivant.
- Ensuite, le géobiologue réalise un diagnostic électrique : les courants parasites sont recherchés et les mises à la terre sont examinées avec attention. Les recommandations reposent sur la définition de valeurs de résistance très inférieures aux normes en vigueur et sur l'implantation de prises de terre dans un milieu neutre, sans cours d'eau ni faille souterraine susceptible de disperser les courants vagabonds. Les liaisons équipotentielles sont multipliées afin de supprimer tout différentiel de potentiel.

Cette discipline, non scientifique, cherche encore à se structurer pour démontrer la fiabilité de ses mesures. Ainsi, nous ferons appel à des professionnels membres de l'association nationale de géobiologie qui permet de s'assurer que celui-ci est en accord avec un code déontologique et une charte pratique et professionnelle. Cette démarche nous permettra de nous assurer de la bonne conduite du professionnel, et nous utiliserons son analyse à titre indicatif dans l'attente que la discipline soit reconnue scientifiquement. Une étude sera réalisée avant les travaux puis à l'issue du raccordement de la centrale.

5.3.6.3. MESURE DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES HAUTE ET BASSE FREQUENCES

Une étude indépendante sera réalisée par le bureau d'étude spécialisé Mantenna Expertise et des mesures des champs électromagnétiques (haute et basse fréquence) dans les parcelles test et témoin seront effectuées :

- Avant le début de la construction,

- Après la construction et le raccordement de la centrale (mesures lorsque la centrale est en production, et mesures lorsqu'elle est à l'arrêt),
- Puis une mesure / an.

Les niveaux de champs électromagnétiques mesurés seront comparés avec la réglementation en vigueur – Décret 2002-775 du 3 mai 2002, qui définit les valeurs limites d'exposition électromagnétique dans le domaine public. Les points de mesures seront géographiquement répartis sur le champ des panneaux photovoltaïques avec une cohérence de mise en situation, et les mesures seront réalisées à hauteur d'animal.

5.3.7. BILAN ECONOMIQUE

Concernant les aspects socio-économiques, un bilan économique de l'élevage sera réalisé pour les deux conditions (sous l'ombrière et sur la parcelle témoin) à la fin de chaque année. Il prendra en compte notamment :

- Coût de l'alimentation (prix versus consommation selon la condition),
- Frais vétérinaires (traitements et interventions pour chaque condition),
- Coût de l'eau,
- Coût de l'énergie.

Cette étude permettra ainsi de valider l'intérêt économique pour l'élevage du système photovoltaïque testé (en dehors du gain de revenu grâce au loyer perçu par l'éleveur).

5.3.8. BILAN CARBONE

Afin de préciser les interactions entre l'élevage et l'environnement et d'engager des démarches de progrès avec les éleveurs, les filières d'élevage de ruminants ont développé un outil d'évaluation et d'appui technique, CAP'2ER. Accompagnés par l'IDELE, un bilan CAP'2ER sera réalisé en amont de l'implantation de la structure agrivoltaïque puis au cours du projet expérimental un nouveau bilan pour chaque modalité : test et témoin. Cela permettra d'évaluer l'impact positif de la structure agrivoltaïque sur l'exploitation. Il faut noter que l'un des leviers d'actions d'une exploitation pour améliorer son bilan carbone est d'installer des énergies renouvelables.

A l'issue de l'opération de R&D sur la partie élevage, les connaissances acquises permettront d'évaluer les impacts provoqués par la mise en place d'une structure photovoltaïque sur les performances zootechniques et le bien-être de différents animaux de rente. Ces connaissances permettront l'application de cette structure à plus grande échelle sur le territoire français.

5.4. ACTEURS IMPLIQUES

La mise en place d'un projet pilote nécessite de bien définir pour chaque partie prenante, c'est-à-dire TSE, l'exploitant et les partenaires R&D :

- Quelles sont ses missions ? ;
- Quels relevés sont attribués à chacun ? ;
- Quelle est la fréquence des relevés ? ;
- Quelle est la durée des relevés ?
- Quels rendus (i.e. rapports intermédiaires, bilans annuels, etc.) sont prévus ?

Des contrats de prestations de service sont mis en place afin de décrire le périmètre de chaque partie prenante du projet.

5.4.1. ROLE DE L'ELEVEUR

L'exploitant sera également indemnisé financièrement pour la location des parcelles test et témoin, ainsi que pour sa participation à la mise en place des différentes observations sur le terrain et à la valorisation des travaux effectués. En effet, il pourra être impliqué dans les tâches suivantes :

- Validation avec TSE et l'IDELE des mélanges multi-espèces proposés et acceptation du découpage des parcelles test et témoin en fonction des semis,
- Détermination avec TSE du plan de pâturage tournant et mise en place d'un calendrier d'enregistrements quotidien des jours pâturés,
- Acceptation de l'installation d'équipement de suivi des performances zootechniques et du bien-être animal,
- Aide à la mise en place des outils d'identification et de monitoring des animaux,
- Observation régulière de l'état corporel et de santé des animaux,
- Maintien du registre sanitaire et du registre d'élevage,
- Communication régulière aux équipes de TSE des problèmes rencontrés,
- Accepter les visites de tiers sur le site pilote, qui est une vitrine, et participation à ces visites en faisant une présentation orale des avantages de l'ombrière.

L'agriculteur exploitant sera donc associé étroitement et moteur dans la réalisation de l'essai. Il est parfaitement informé de tous les enjeux du Projet, qui ne génère pour lui aucun conflit d'usage, mais lui offre au contraire la possibilité de diversifier ses méthodes en répondant aux besoins agronomiques (agriculture plus durable, moins exigeante en besoin d'eau), économiques (valoriser sa production agricole et trouver des débouchés alimentaires locaux) et sociétaux (produire de l'énergie verte et mieux cultiver la terre).

5.4.2. ROLE DE TSE

Les équipes R&D agronomique de TSE auront la charge de :

- La mise en place des protocoles et le choix des variétés à semer avec les partenaires scientifiques cités ci-dessous ;
- Le suivi des essais sur le site : mesures, notations, prélèvements, photos... ;
- Le traitement des résultats avec les partenaires : analyses statistiques, mécanistiques, bases de données, synthèses annuelles ;
- Échanger avec les agriculteurs, les prestataires et partenaires sur le déroulement des expérimentations ;

Communiquer à l'aide de rapports, présentations et articles scientifiques sur les résultats obtenus.

5.4.3. LES PARTENAIRES SCIENTIFIQUES ET PRESTATAIRES

TSE a fait appel à plusieurs prestataires externes en R&D agronomique. Les observations sur le terrain, les mesures et traitements des résultats seront réalisés par l'équipe scientifique de TSE, ainsi que par l'institut de l'élevage (IDELE).

L'IDELE est l'institut technique de référence en matière d'élevage de ruminants. Sa vocation est d'améliorer la compétitivité des élevages herbivores et de leurs filières, tout en apportant des éléments de réponse aux questions sociétales. Ses travaux apportent des solutions techniques aux éleveurs de bovins, ovins (lait et viande), veaux de boucherie, caprins et équins et aux acteurs économiques des filières. Ses domaines d'expertises sont vastes : l'économie de l'élevage, la conduite des animaux, la génétique, les équipements, l'environnement, les fourrages, l'accompagnement numérique, les produits lait et viande. L'IDELE a publié en 2021 un guide « Entretenir un parc photovoltaïque avec des ruminants » auquel TSE a contribué. Ils sont également partenaire du projet « Cap Protéines » : le volet élevage du Plan protéines, confié à l'IDELE, vise à accroître l'autonomie protéique des élevages de ruminants et des territoires. La souveraineté protéique de la France à l'horizon 2030

est un sujet stratégique qui touche d'une part à la dépendance nationale aux fluctuations des marchés mondiaux des matières premières riches en protéines (notamment le soja), et d'autre part aux enjeux environnementaux liés à ces cultures.

L'IDELE s'est engagé à nous accompagner pour :

- La mise en place rationnelle d'un pâturage dans le parc agrivoltaïque,
- La mise en place de suivis et d'expérimentations sur le site pour les volets agronomiques, zootechniques, de bien-être animal, de condition de travail, matériel et équipement.

6. BIBLIOGRAPHIE

« Agroforesterie et élevage ». 2018. Web-agri.fr. 2018. <https://www.web-agri.fr/fourrage/article/151097/un-gain-de-gmq-moyen-plus-important-avec-la-presence-d-ombre-dans-les-prairies>.

Andrew, Alyssa C., Chad W. Higgins, Mary A. Smallman, Maggie Graham, et Serkan Ates. 2021. « Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System ». *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.659175>.

Arenas-Corraliza, M. G., V. Rolo, M. L. López-Díaz, et G. Moreno. 2019. « Wheat and Barley Can Increase Grain Yield in Shade through Acclimation of Physiological and Morphological Traits in Mediterranean Conditions ». *Scientific Reports* 9 (1): 9547. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46027-9>.

Armstrong, D. V. 1994. « Heat Stress Interaction with Shade and Cooling ». *Journal of Dairy Science* 77 (7): 2044-50. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6).

Barron-Gafford, Greg A., Mitchell A. Pavao-Zuckerman, Rebecca L. Minor, Leland F. Sutter, Isaiah Barnett-Moreno, Daniel T. Blackett, Moses Thompson, et al. 2019. « Agrivoltaics Provide Mutual Benefits across the Food–Energy–Water Nexus in Drylands ». *Nature Sustainability* 2 (9): 848-55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.

Dinesh, Harshavardhan, et Joshua M. Pearce. 2016. « The potential of agrivoltaic systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 299-308.

Dupraz, Christian, Hélène Marrou, Grégoire Talbot, Lydie Dufour, A. Nogier, et Y. Ferard. 2011. « Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes ». *Renewable energy* 36 (10): 2725-32.

Elamri, Yassin, Bruno Cheviron, J.-M. Lopez, C. Dejean, et Gilbert Belaud. 2018. « Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces ». *Agricultural water management* 208: 440-53.

FNSEA. 2021. « Réforme de la politique de gestion des risques : les évènements climatiques estivaux imposent une réforme véritablement ambitieuse dès cette année ! » *fnsea.fr* (blog). 2021. <https://www.fnsea.fr/communiqués-de-presse/reforme-de-la-politique-de-gestion-des-risques-les-evenements-climatiques-estivaux-imposent-une-reforme-veritablement-ambitieuse-des-cette-annee/>.

Fu, Jing, Chao-Hai Li, Jiu-Ran Zhao, Li Ma, et Tian-Xue Liu. 2009. « Shade-tolerance indices of maize: Selection and evaluation. » *Yingyong Shengtai Xuebao* 20 (11).

« Gaillac. "Après ce gel exceptionnel, il faut laisser la vigne tranquille" assure Olivier Yobrégat, ingénieur agronome ». 2021. *ladepeche.fr*. 2021. <https://www.ladepeche.fr/2021/04/25/apres-ce-gel-exceptionnel-il-faut-laisser-la-vigne-tranquille-9508621.php>.

Ginane, Cécile, Véronique Deiss, Mickaël Bernard, Cécile Payen, Camille Beral, et Dorothee Bizeray-Filoché. 2018. « Pâturage sur prairies agroforestières: quels impacts des arbres sur le comportement, le bien-être et les performances des ovins? » In 24. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants (3R)*. Institut de l'Élevage-INRA.

« Intempéries : quelles conséquences pour l'agriculture ? » 2018. France 3 Nouvelle-Aquitaine. 2018. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/nouvelle-aquitaine/creuse/intemperies-queelles-consequences-agriculture-1492203.html>.

« Les incendies de moisson placés sous haute surveillance ». 2020. Réussir Grandes Cultures : le média des céréaliers. 2020. <https://www.reussir.fr/grandes-cultures/les-incendies-de-moisson-places-sous-haute-surveillance>.

Marrou, Hélène, Lydie Dufour, et Jacques Wery. 2013. « How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? » *European Journal of Agronomy* 50: 38-51.

Marrou, Hélène, Jacques Wéry, Lydie Dufour, et Christian Dupraz. 2013. « Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels ». *European Journal of Agronomy* 44: 54-66.

« Pertes liées au gel : les agriculteurs commencent à sortir leur ardoise ». 2021. 2021. <https://www.terre-net.fr/actualite-agricole/economie-social/article/pertes-liees-au-gel-les-agriculteurs-commencent-a-sortir-leur-ardoise-202-178068.html>.

Ravi, Sujith, Jordan Macknick, David Lobell, Christopher Field, Karthik Ganesan, Rishabh Jain, Michael Elchinger, et Blaise Stoltenberg. 2016. « Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands ». *Applied Energy* 165: 383-92.

Renna, Manuela, Carola Lussiana, Vanda Malfatto, Antonio Mimosi, et Luca Maria Battaglini. 2010. « Effect of exposure to heat stress conditions on milk yield and quality of dairy cows grazing on Alpine pasture ». In *Proceedings of 9th European IFSA Symposium*. Vol. 4.

Sekiyama, Takashi, et Akira Nagashima. 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.

Silva-Pérez, Viridiana, Joanne De Faveri, Gemma Molero, David M. Deery, Anthony G. Condon, Matthew P. Reynolds, John R. Evans, et Robert T. Furbank. 2020. « Genetic variation for photosynthetic capacity and efficiency in spring wheat ». *Journal of experimental botany* 71 (7): 2299-2311.

Valladares, Fernando, et Ülo Niinemets. 2008. « Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences ». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39: 237-57.

Valle, Benoît, Thierry Simonneau, Francis Sourd, Philippe Pechier, Philippe Hamard, Thibault Frisson, Maxime Ryckewaert, et Angélique Christophe. 2017. « Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops ». *Applied energy* 206: 1495-1507.

« Vignes : la récolte 2021 sera "la plus faible du siècle dernier et du siècle actuel", selon le président national des Vignerons indépendants ». 2021. Franceinfo. 3 septembre 2021. https://www.francetvinfo.fr/economie/emploi/metiers/agriculture/vignes-la-recolte-2021-sera-la-plus-faible-des-deux-derniers-siecles-selon-le-president-national-des-vignerons-independants_4758567.html.

Xu, Mingli, Tieqiang Hu, et R. Scott Poethig. 2021. « Low light intensity delays vegetative phase change ». *Plant physiology* 187 (3): 1177-88.

