



# **Projet pilote d'ombrières agrivoltaïques Site de Villefranche d'Allier (03)**

Dossier de demande d'examen au cas par cas

Annexe 9

Note technique sur la synergie avec l'usage agricole

55 Allée Pierre Ziller, Atlantis 2

06560 Valbonne

France

Février 2023

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Préambule.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Etat de l'art .....</b>	<b>4</b>
2.1	Impacts du réchauffement climatique sur l'agriculture .....	4
2.1.1	Effets du réchauffement climatique .....	4
2.1.2	Conséquences sur l'agriculture .....	5
2.2	Usage de l'agroforesterie et bénéfices de l'ombrage.....	7
2.2.1	Abri pour les animaux .....	7
2.2.2	Creation d'un micro-climat .....	7
2.2.3	Combinaison agriculture et photovoltaïque .....	8
<b>3</b>	<b>Présentation de l'exploitation.....</b>	<b>10</b>
3.1	Conduite d'élevage .....	10
3.2	Surface agricole utilisée .....	10
3.3	Pourquoi se tourner vers l'agrivoltaïsme .....	10
<b>4</b>	<b>Solution agrivoltaïque .....</b>	<b>11</b>
4.1	Réponses aux besoins agricoles exprimés .....	11
4.1.1	Partage de la lumière .....	11
4.1.2	Construire une synergie agricole.....	14
<b>5</b>	<b>Conduite du Projet expérimental .....</b>	<b>15</b>
5.1	Objectifs du projet expérimental .....	15
5.2	Surface expérimentale .....	15
5.2.1	Plan d'exploitation .....	15
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 .....	18
5.3.1	Matériel.....	18
5.3.2	Paramètres agronomiques : prairies multi-espèces.....	18
5.3.3	Paramètres environnementaux .....	19
5.3.4	Bien-être animal.....	19
5.3.5	Performances zootechniques.....	20
5.3.6	Champs électromagnétiques .....	20
5.3.7	Bilan économique.....	20
5.3.8	Bilan carbone .....	21
5.4	Acteurs impliqués .....	21
5.4.1	Rôle de l'éleveur.....	21
5.4.2	Rôle de TSE .....	21
5.4.3	Les partenaires scientifiques et prestataires .....	22
<b>6</b>	<b>Biodiversité .....</b>	<b>22</b>
6.1	Mesures en faveur de la biodiversité .....	22
6.2	Intégration paysagère .....	22
<b>7</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>22</b>

## 1 PREAMBULE

Les objectifs nationaux de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (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 Villefranche d'Allier dans le département de l'Allier (03), 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.).

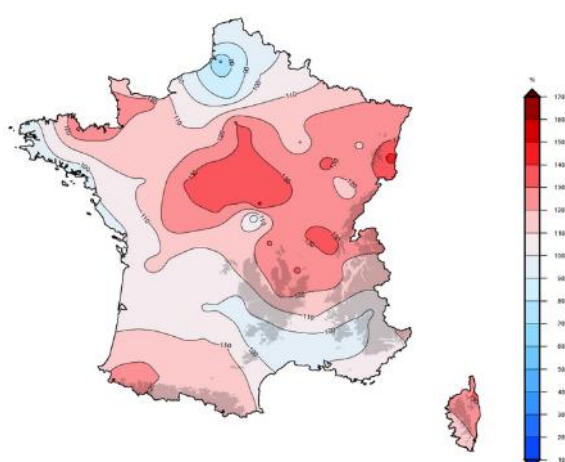


Figure 2. Rapport à la moyenne saisonnière de référence 1991-2010 de la durée d'ensoleillement.

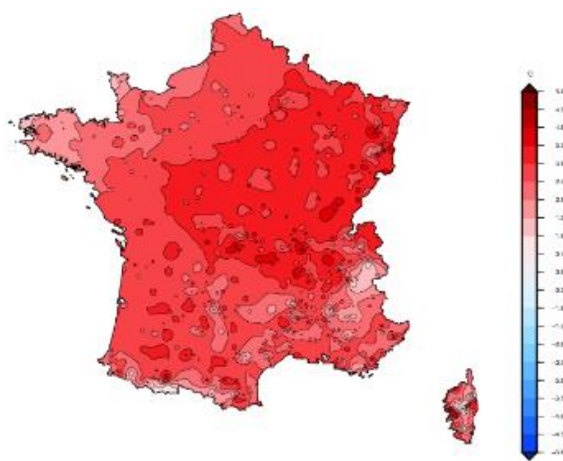


Figure 3. Ecart à la moyenne saisonnière de référence 1981-2010 de la température moyenne.

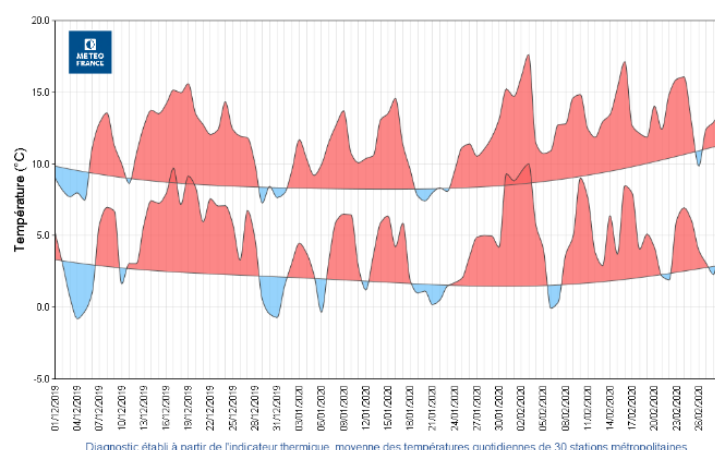


Figure 1. Evolution des températures minimales et maximales quotidiennes en France par rapport à la normale quotidienne du 1er décembre 2019 au 29 février 2020.

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 au dépend 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.

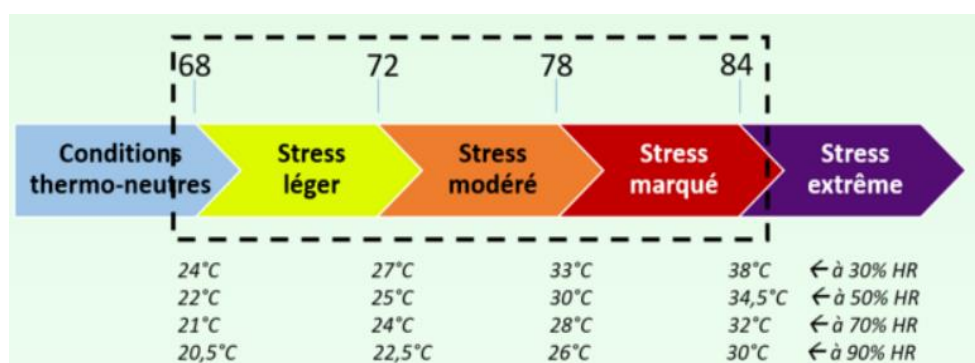


Figure 4. Niveaux de stress thermique des animaux selon les conditions climatiques.

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<sup>ème</sup> 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'OMBRAGE

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.

### 2.2.1 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.

### 2.2.2 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.

---

### 2.2.3 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 maraîchères 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

#### 3.1 CONDUITE D'ELEVAGE

L'exploitation sur laquelle le projet sera implanté se situe au lieu-dit le Chanoine, sur la commune de Villefranche-d'Allier. Il s'agit d'un élevage de bovins pour la production de viande en agriculture conventionnelle. Le propriétaire-exploitant élève un cheptel variant entre 350 et 400 bovins. Deux races sont principalement élevées : L'Aubrac et la Charolaise. Le cheptel se diversifie de la manière suivante :

- Un premier lot de vaches allaitantes en pâture à l'année. Elles ont un accès libre au bâtiment pour être complémentées. Elles sont rentrées une fois par an pour le vêlage en bâtiment puis remise à l'herbe ;
- Un second lot, le principal, est en bâtiment en hiver (à partir de fin novembre/décembre) et en pâture à partir de mi-mars. Ce lot est mené avec 2 périodes de naissance afin de limiter le risque sanitaire et en cas de problème pour l'éleveur (ex : accident incapacitant sur une durée déterminée) ;
- Un lot de bovins que le FEDER (Coopérative agricole) laisse en pension pour la finition de l'engraissement.

Afin de tendre vers l'autonomie protéique, les bovins à l'engraissement sont complémentés avec un mélange de luzerne et de trèfle violet récolté par l'exploitant. Il distribue également si nécessaire des compléments à base de céréales récoltées sur place également et parfois des correcteurs azotés achetés. Les veaux sont quant à eux complémentés jusqu'à leur sevrage avec un aliment fibreux récolté sur l'exploitation.

A la suite de l'engraissement, 100% de la production est abattu et redirigé directement par l'abattoir selon les besoins du marché. Une partie de la production peut parfois partir en Filière Qualité Carrefour si la conformation et le poids des carcasses rentrent dans le cahier des charges prévu. Il peut arriver que certains bovins soient abattus et revendus en circuit court mais cela est peu pratiqué par l'éleveur.

#### 3.2 SURFACE AGRICOLE UTILISEE

L'exploitant compte environ 260 hectares de surface agricole utilisée. Les surfaces sont divisées de la manière suivante :

- 25 à 30 hectares de prairies temporaires en légumineuses (Luzerne/Trèfle Violet) pour la fauche ;
- 80 hectares de prairies permanentes (prairies naturelles avec des rendements variables selon les années) pour le pâturage et la fauche ;
- 90 hectares en culture de blé/maïs/triticales.

#### 3.3 POURQUOI SE TOURNER VERS L'AGRIVOLTAÏSME

Le propriétaire-exploitant est un éleveur qui souhaite améliorer ses pratiques en adoptant une approche plus extensive de sa production. En effet, il voudrait diminuer le nombre d'animaux à l'engraissement en bâtiment et les sortir davantage.

Or 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, et cela implique aussi une charge de travail supplémentaire pour l'éleveur.

L'éleveur observe également ses 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 à la recherche de zones ombragées proposées par les arbres qui sont en présence limitée. Les bovins sont 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. A noter que lors de la reprise d'activité agricole par l'éleveur, de nombreuses haies et arbres ont été retirés des contours des parcelles pour installer un drainage des parcelles trop hydromorphes, diminuant alors les surfaces ombragées et les corridors de biodiversité de son exploitation.

La volonté actuelle de l'exploitant est de participer à cette étude expérimentale menée sur les bovins et l'ombrière d'élevage pour observer quels sont les effets de l'ombre portée sur le stress thermique des animaux et la productivité des prairies en-dessous. Les résultats obtenus lui permettraient potentiellement de faire évoluer ses pratiques.

## 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 CO<sub>2</sub>,
- L'espèce végétale,
- La variété (i.e. génotype).

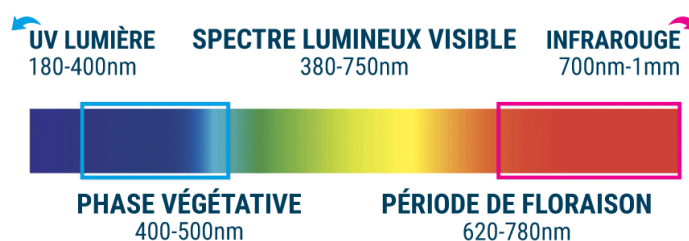


Figure 5. Spectre lumineux et Rayonnement photosynthétiquement actif

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).

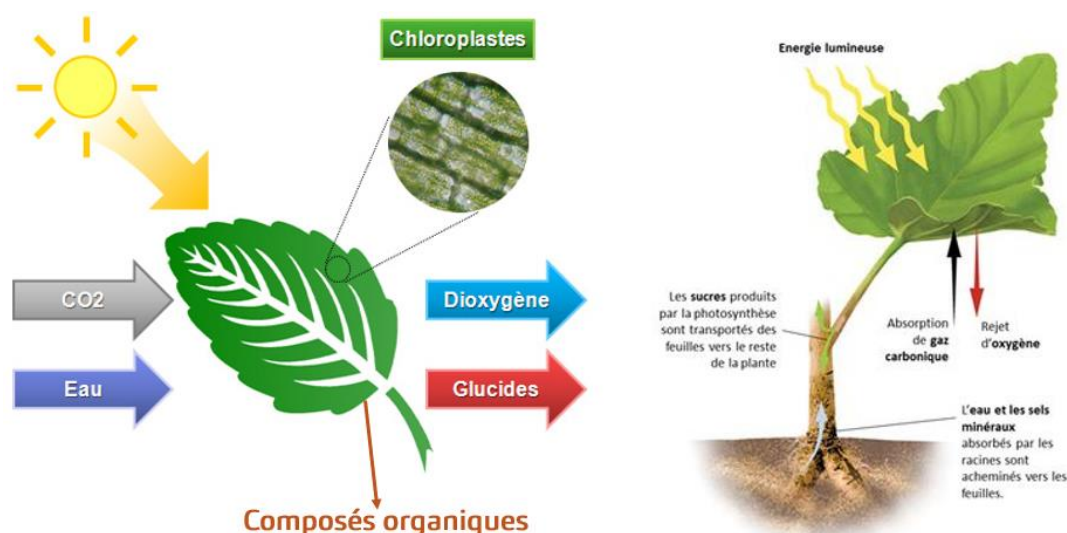


Figure 6. Principe générale de la photosynthèse : conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique, fixation du carbone, synthèse des sucres et teneurs en chlorophylle

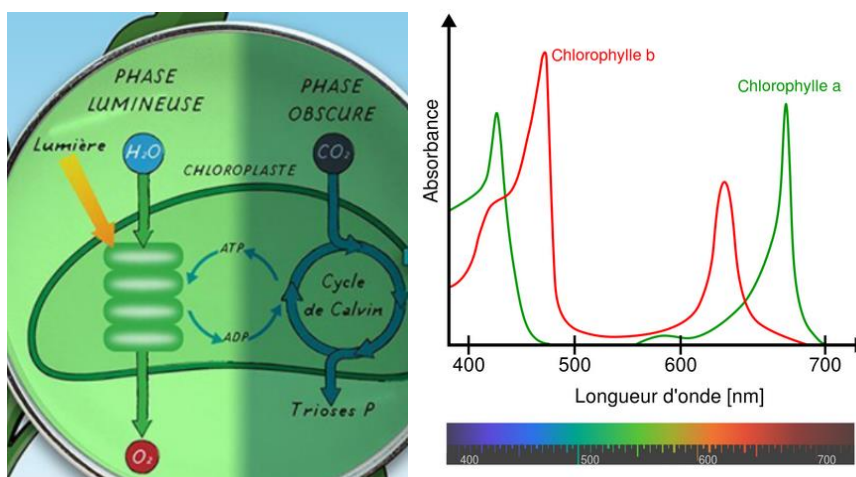


Figure 7. Schéma du fonctionnement du chloroplaste lors des phases lumineuse et obscure (à gauche) et absorption de la lumière par les chlorophylles a et b selon la longueur d'onde (à droite)

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).

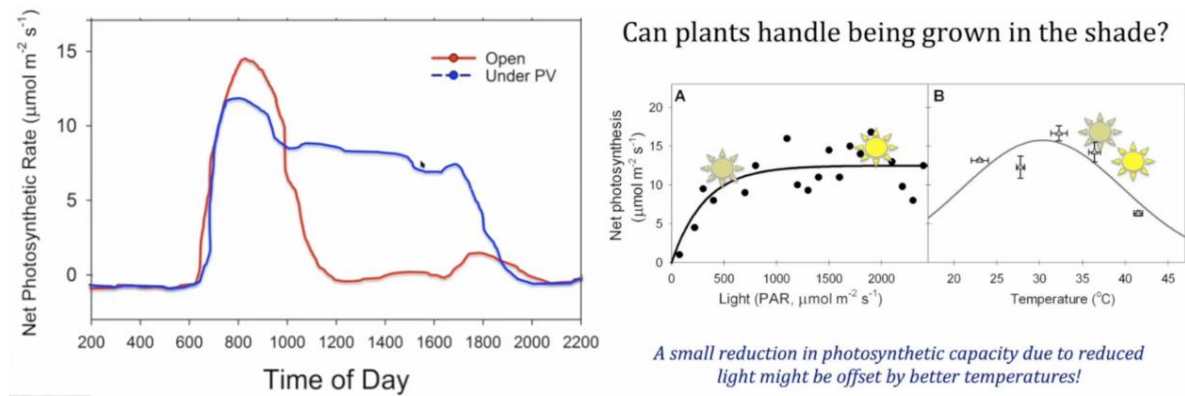


Figure 8. Activité photosynthétique en fonction de la luminosité et de la température

Les sommes de températures journalières seront modifiées, ainsi que les cycle 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 CO<sub>2</sub> (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 devançant les besoins en CO<sub>2</sub> 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 développé.

## 5 CONDUITE DU PROJET EXPERIMENTAL

### 5.1 OBJECTIFS DU PROJET EXPERIMENTAL

A travers un programme de projets pilotes, l'objectif est de valider l'adaptation à l'ombrage partiel de différents mélanges multi-espèces de prairies (graminées, légumineuses et diverses). Le but est de vérifier que les prairies et les animaux (notamment les bovins et les ovins) 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 permettront de proposer un panel de mélanges multi-espèces à planter 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. 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 une parcelle à proximité de l'exploitation. Une parcelle témoin proche est également définie. La parcelle expérimentale est actuellement une prairie naturelle, tandis que la parcelle témoin est une prairie artificielle. Ainsi, de nouveaux mélanges seront prévus sur les deux parcelles afin de mettre en place une conduite identique. La parcelle où la structure sera implantée s'étale sur une surface de 6 hectares et la parcelle témoin s'étale sur 9 hectares.



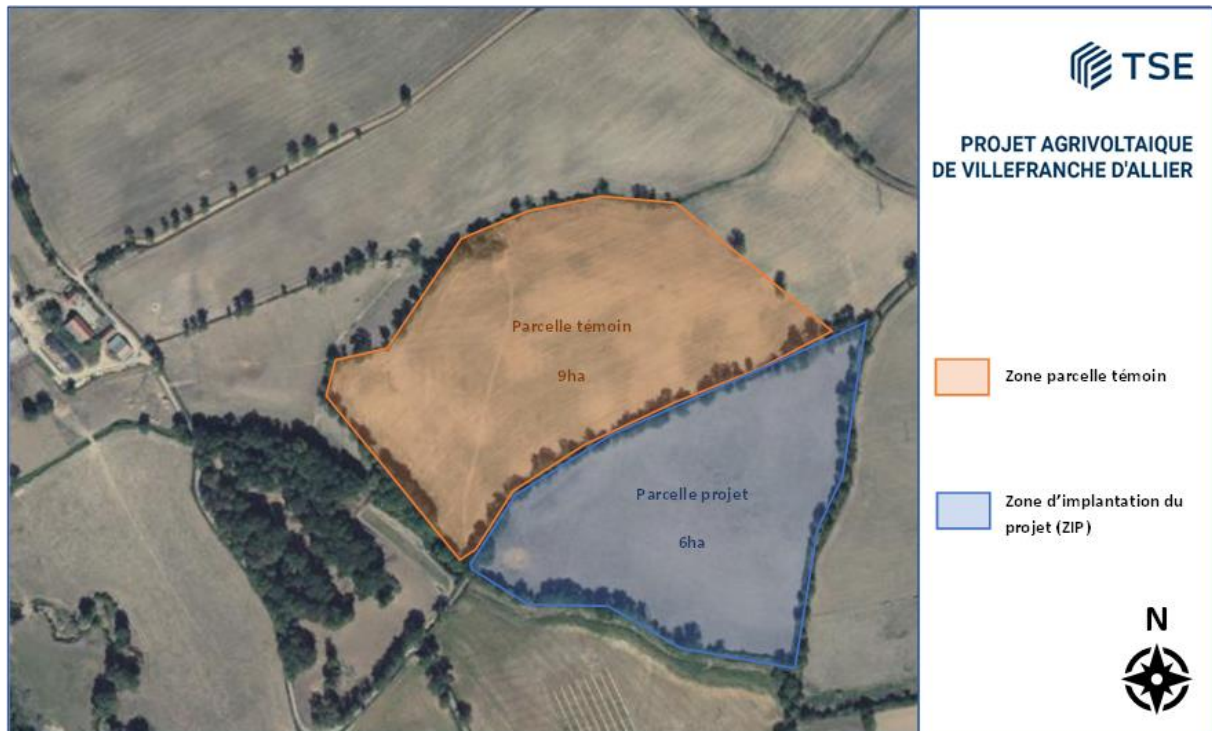


Figure 9. Plan des parcelles prévues pour l'implantation de l'ombrrière élevage et de la parcelle témoin

### 5.2.2 AMENAGEMENTS POUR L'EXPERIMENTATION

Deux types d'implantations des ombrières d'élevage seront testés, avec des largeurs inter-rangées de 10m et 15m pour observer l'impact sur la prairie, les bovins et le travail de l'éleveur.



Figure 10. Design de la centrale agrivoltaïque

Afin de tester les différents mélanges multi-espèces, la parcelle test sera subdivisée en 4 parties et la parcelle témoin en 2 parties permettant l'implantation des 2 mélanges. Au sein de la parcelle test, la division en 4 sous-parcelles permettra de d'évaluer le comportement des prairies sous les modalités suivantes :

- Mélange 1 et ombrrière d'élevage avec inter-rangée de 10m ;
- Mélange 1 et ombrrière d'élevage avec inter-rangée de 15m ;

- Mélange 2 et ombrière d'élevage avec inter-rangée de 10m ;
- Mélange 2 et ombrière d'élevage avec inter-rangée de 15m.



Figure 11. Principe de découpage de sous-parcelles et d'implantation de mélanges multi-espèces sur la parcelle test



Figure 12. Principe de découpage de sous-parcelles et d'implantation de mélanges multi-espèces sur la parcelle témoin

Les animaux seront menés à l'aide d'un pâturage au fil et le sens du pâturage pourra être modifié au cours de l'expérimentation. En effet, il pourra être testé un pâturage le long de l'axe est-ouest pour évaluer le comportement des animaux vis-à-vis de la structure et l'évolution de la prairie. Puis l'année qui suit, les faire pâturer le long de l'axe Nord-Sud pour qu'ils aient la possibilité de choisir entre le mélange le plus appétent et/ou la zone qui leur procure le plus d'ombre au cours de la période de mesure.

### 5.2.3 ADAPTATION DU TRACKING

Afin de permettre aux animaux de pâturer aisément, la rotation des panneaux sera limitée à 1,40m 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 au fil 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 1,40 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 concertation entre l'éleveur et l'équipe en charge de l'exploitation de l'ombrière.

### 5.2.4 ECHANTILLON

La constitution des lots test et témoin des bovins sera effectuée selon plusieurs critères et de telle manière que les lots soient homogènes :

- En âge,
- En poids,
- En race,
- De sorte que le chargement au m<sup>2</sup> sur les parcelles test et témoin soit le même pour les 2 lots.

Lorsque des bovins seront ajoutés au cours de l'expérimentation, un équilibre entre les deux groupes sera conservé. Les animaux seront bouclés avec un numéro unique RFID afin d'avoir un suivi individuel.

## 5.3 MATERIELS ET METHODES

### 5.3.1 MATERIEL

Pour mener à bien cette expérimentation, TSE prévoit d'équiper à ses frais l'éleveur exploitant de plusieurs dispositifs tels que :

- **Système d'identification des bovins** (aux oreilles et/ou pattes), permettant différents types de mesures comme l'identification, la bascule de la pesée, le suivi du podomètre pour la distance parcourue, etc. ;
- **Système de pesée**, installé avec le parc de contention pour suivre le gain moyen quotidien des animaux ;
- **Logiciel métier** permettant de collecter toutes les données récoltées avec les outils précédents accessible à distance (pour une gestion depuis les locaux de TSE) ;
- **Clôtures** (piquets, matériaux pour le chemin et le terrassement, barrières, etc.).

### 5.3.2 PARAMETRES AGRONOMIQUES : PRAIRIES MULTI-ESPECES

L'objectif sera d'abord de voir l'intérêt de la structure sur la disponibilité de chaque espèce des mélanges lorsque les conditions seront chaudes et sèches par rapport à la parcelle témoin. Une fois que le mélange le plus adapté sous le tracker pour chaque projet sera identifié, il sera possible de réfléchir sur un protocole à décliner pour affiner le choix d'espèce et la composition variétale dans d'autres situations.

Les mélanges multi-espèces qui seront testés intégreront des espèces de graminées, de légumineuses et de diverses. Le choix des mélanges multi-espèces sera réfléchi avec l'IDELE en fonction du contexte pédoclimatique (structure, qualité et niveau de salissement du sol) et au regard des pratiques locales discutées avec l'éleveur. La composition des 2 mélanges testés tiendra 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'ombre tournante projetée par les panneaux et son effet sur la réduction des stress thermique et hydrique. Les espèces seront choisies selon 3 critères :

- La fonction production
- La fonction qualité
- La fonction engazonnement

Après implantation et chaque année, les analyses suivantes seront réalisées :

- Un suivi de la croissance de l'herbe pour mesurer et évaluer les différences de cinétiques et les volumes de production selon l'exposition à l'ombre. Cette analyse repose sur une mesure hebdomadaire de la croissance à l'aide d'un herbomètre, sur les zones ombragées et témoins ;
- L'évolution de la composition floristique des différents mélanges au cours du temps pour estimer le vieillissement de la prairie. Une petite parcelle témoin, en fin de bandes pour chaque mélange sera préservée de la présence animale, afin de voir aussi l'effet des panneaux sur ce critère. Cela permettra de suivre la pérennité des espèces implantées, l'évolution des équilibres et de capitaliser les observations pour les situations futures (impact du pâturage sur la flore) ;
- La valeur nutritive des fourrages verts (digestibilité au premier cycle, valeur UFL/kg MS, valeur azotée).

Les surfaces test et témoin permettront d'avoir suffisamment de zones homogènes, donc avec des observations et mesures fiables pour éviter tout biais.

Le terrain sera finement cartographié (profil cultural, fertilité physico-chimique et biologique, faune et flore, état structural, Capacité d'Echanges Cationique, ratio C/N, conductivité électromagnétique pour voir l'hétérogénéité) afin d'avoir les résultats et les conclusions les plus fiables possibles, pour chacune des modalités.

---

### 5.3.3 PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX

Des stations météo, sondes et capteurs seront installés sur chaque sous-modalité pour mesurer en continu les paramètres agro-climatiques :

- Les précipitations,
- Les températures : sous abri à 2m au-dessus du sol, à la surface du sol et à 20cm de profondeur,
- L'humidité relative du sol (à différents horizons) de la prairie,
- Le rayonnement (irradiation directe, albédo)
- La vitesse et la direction du vent, etc.

Ces données permettront de caractériser les conditions climatiques auxquelles les animaux étaient exposés et de les corrélérer avec des modifications du bien-être et/ou de la production.

---

### 5.3.4 BIEN-ETRE ANIMAL

Sur l'aspect du bien-être animal, l'analyse se fera en se basant sur le principe des 5 libertés individuelles, défini par l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) :

- Absence de faim, de soif et de malnutrition : l'animal doit avoir accès à l'eau et à une nourriture en quantité appropriée et correspondant aux besoins de son espèce ;
- Absence de peur et de détresse : les conditions d'élevage ne doivent pas lui induire de souffrances psychiques ;
- Absence de stress physique et/ou thermique : l'animal doit disposer d'un certain confort physique ;
- Absence de douleur, de lésions et de maladie : l'animal ne doit pas subir de mauvais traitements pouvant lui faire mal ou le blesser et il doit être soigné en cas de maladie ;
- Liberté d'expression d'un comportement normal de son espèce : son environnement doit être adapté à son espèce (il doit être en groupe si c'est une espèce sociale par exemple).

Afin d'évaluer le bien-être des animaux, nous nous appuierons sur le « Welfare Quality Assessment protocol ». Ce protocole est issu du projet européen, du même nom qui a été mené entre 2004 et 2010 et a associé des partenaires de plus de 40 institutions provenant de 13 pays. L'objectif était de développer des outils d'évaluation

du bien-être des animaux en élevage validés scientifiquement et qui permettent de synthétiser les résultats obtenus en une information claire et standardisée. Ainsi, 4 principes à observer ont été mis en évidence :

- Bonne alimentation,
- Bon logement,
- Bonne santé,
- Comportements appropriés.

---

### 5.3.5 PERFORMANCES ZOOTECHNIQUES

---

#### 5.3.5.1 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).

---

#### 5.3.5.2 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

Afin de caractériser la présence de champs électromagnétiques générés par la structure, une étude indépendante sera réalisée par un bureau d'étude spécialisé. Une mesure du champ électromagnétique dans les parcelles test et témoin seront effectuées avant l'entrée des animaux. 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.

Enfin, pour caractériser le risque de champs électromagnétiques parasites, une cartographie de la conductivité du sol sera réalisée par BeApi. Cette carte pourra également être comparée avec les résultats obtenus par le bureau d'étude.

---

### 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

---

#### 5.4.1 ROLE DE L'ELEVEUR

TSE équipera l'éleveur pour les différentes prises de mesures à ses frais. L'éleveur 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 mesures 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 quotidiens des jours pâturés,
- Prise en charge du suivi agronomique des prairies après formation auprès de l'IDELE (ex : suivi de la croissance de l'herbe avec un herbomètre, prélèvement de biomasse sous et hors structure agrivoltaïque pour analyses, etc.),
- Acceptation du passage 2 fois / an d'un prestataire pour l'analyse de la composition floristique sous et hors structure agrivoltaïque,
- 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 communication régulière aux équipes de TSE,
- 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.

---

#### 5.4.2 ROLE DE TSE

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

- La mise en place des protocoles avec les partenaires scientifiques cités ci-dessous,

- Le suivi des essais sur le site : mesures, notations, prélèvements, photos, vidéos, etc.
- Le traitement et la diffusion des résultats avec les partenaires : analyses statistiques, mécanistiques, bases de données, synthèses annuelles,
- Echanger avec les agriculteurs, les prestataires et partenaires sur le déroulement des expérimentations.

#### 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 BIODIVERSITE

### 6.1 MESURES EN FAVEUR DE LA BIODIVERSITE

Par l'absence de la consommation d'espace naturel, agricole et forestier, le procédé d'implantation de la structure de production d'énergie renouvelable préserve les écosystèmes. Le renforcement des haies bocagères et l'usage de végétaux locaux seront associés dans le but d'apporter un gain de biodiversité.

### 6.2 INTEGRATION PAYSAGERE

Une réflexion autour de l'intégration environnementale de l'ombrière est menée dès la phase de développement. Compte-tenu des haies déjà présentes en périphérie du projet, peu de points de vue sur la structure sont présents. La haie existante sera renforcement au sud-est, ce qui contribuera également à renforcer les bénéfices en termes de biodiversité (cultures, insectes), humidité, fertilité, pollinisation (espèces mellifères), co-produits d'élevage et de protection contre le vent, les stress et les prédateurs (lutte auxiliaire).

## 7 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 événements 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 Dorothée 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'Elevage-INRA.

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