



DOSSIER DES JUSTIFICATIONS RELATIVES A LA REGLEMENTATION AGRIVOLTAÏSME

PROJET AGRIVOLTAÏQUE DE SAULVAUX (55)

Rapport d'étude

Décembre 2024

Rédacteur : Alizée LOISEAU

Sommaire

1	PREAMBULE.....	5
2	DESCRIPTION DU PROJET AGRIVOLTAÏQUE	6
3	DESCRIPTION PHYSIQUE DE LA PARCELLE	8
4	SERVICES APPORTES PAR L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE	11
4.1	Amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques.....	11
4.1.1	Amélioration des qualités agronomiques du sol et du rendement.....	11
4.1.2	Remise en activité agricole.....	12
4.2	Adaptation au changement climatique.....	12
4.2.1	Limitation de l'impact thermique.....	12
4.2.2	Limitation de l'impact hydrique	13
4.2.3	Limitation de l'impact radiatif	13
4.3	Protection contre les aléas.....	16
4.4	Amélioration du bien-être animal	16
4.5	Synthèse des services rendus par le projet d'installation agrivoltaïque de Saulvaux.....	17
5	LA PRODUCTION AGRICOLE EST L'ACTIVITE PRINCIPALE DE LA PARCELLE AGRICOLE	18
5.1	Superficie non exploitable.....	18
5.2	Adaptation du parc à l'activité agricole	19
5.2.1	Hauteur du bas de panneaux	20
5.2.2	Ecartement des rangées de panneaux	21
5.3	Taux de couverture.....	21
6	SIGNIFICATIVITE DE LA PRODUCTION AGRICOLE ET DU REVENU DE L'EXPLOITANT AGRICOLE.....	22
6.1	Significativité de la production agricole.....	22
6.2	Revenu durable de l'exploitant agricole	22

7	ATTESTATION CERTIFIANT QUE L'AGRICULTEUR EST ACTIF	24
8	ANNEXE 1 : MEMOIRE DE SYNERGIES AGRICOLES.....	25

Table des figures

Figure 1 : Synthèse des obligations issues du décret du 8 avril et de l'arrêté du 5 juillet 2024 (Source : Agrosolutions).....	5
Figure 2 : Carte de la localisation du projet agrivoltaïque de Saulvaux.....	6
Figure 3 : Plan de masse du parc agrivoltaïque du projet de Saulvaux, source : Destren Energies.....	8
Figure 4 : Carte de l’emprise du projet sur les parcelles cadastrales et agricoles (source : Vent d’Est).....	9
Figure 5 : Cartographie du potentiel agronomique des sols – Sol &co©	10
Figure 6 : Plan de coupe d'un tracker, source : Destren Energies	19
Figure 7 : Plan de l'inter-rang de 14 m	19
Figure 8 : Localisation de la zone cultivée par rapport à la rotation des panneaux	20
Figure 9 : Schéma de la méthode de calcul du taux de couverture	21

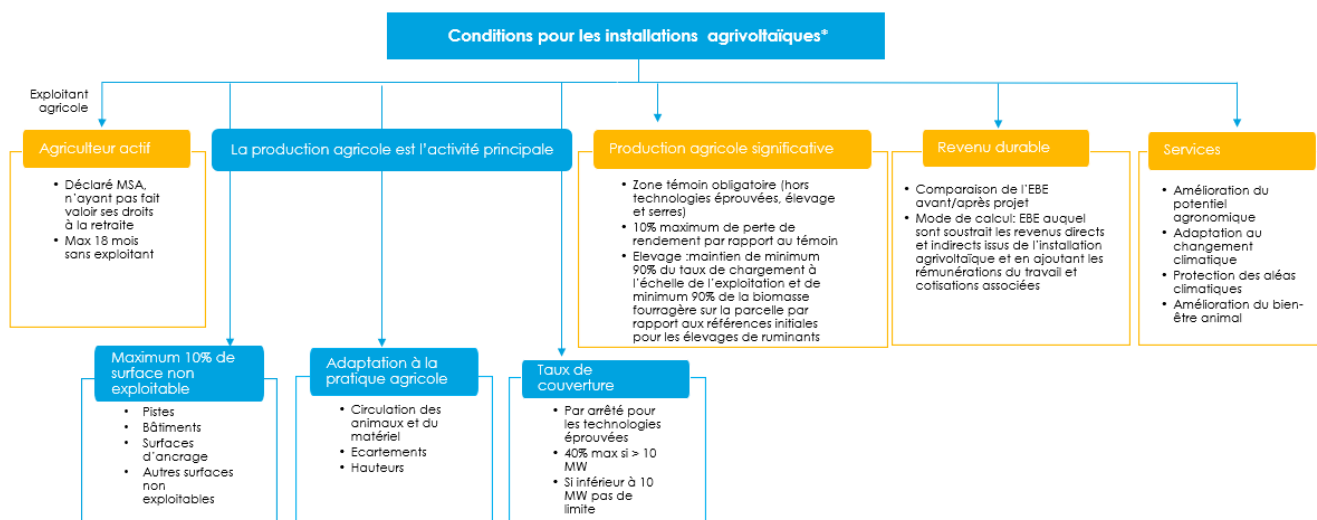
Table des tableaux

Tableau 1 : Territoire concerné par le projet	6
Tableau 2 : Description des parcelles agricoles impactées par le projet.....	9
Tableau 3 : Limitation de l’impact thermique	12
Tableau 4 : Limitation de l’impact hydrique.....	13
Tableau 5 : Impact de l’ombrage sur la culture du blé et sur la culture de l’orge.....	14
Tableau 6 : Impact de l’ombrage sur la culture du luzerne.....	16
Tableau 7 : Services apportés aux productions agricoles par le projet agrivoltaïque de Saulvaux.....	17
Tableau 8 : Calcul de la surface non exploitable	18
Tableau 9 : Hauteur du bas de panneaux.....	20
Tableau 10 : Ecartement des rangées de panneaux	21
Tableau 11 : Calcul du taux de couverture du projet	22

1 Préambule

Ce dossier vise à présenter les justifications détaillées du respect des conditions prévues à l'article L. 314-36 du code de l'énergie¹. Par conséquent, ce dossier comporte :

1. Une description physique des parcelles mentionnée à l'article R. 314-108 du code de l'énergie ;
2. Une note technique justifiant que l'installation, l'ouvrage ou la construction fournit au moins l'un des services mentionnés aux 1° à 4° du II de l'article L. 314-36 du code de l'énergie selon les conditions fixées à l'un des articles R. 314-110 à R. 314-113 du même code et qu'il ne porte pas une atteinte substantielle à l'un de ces services ou une atteinte limitée à deux de ces services ;
3. Une note technique justifiant que la production agricole est l'activité principale des parcelles agricoles conformément à l'article R. 314-118 du code de l'énergie ;
4. Une note technique justifiant que la production agricole est significative et qu'elle assure des revenus durables à l'exploitant agricole conformément aux articles R. 314-114 à R. 314-117 du code de l'énergie ;
5. S'il y a lieu, d'une description de la zone témoin prévue en application de l'article R. 314-114 du code de l'énergie ;
6. Une attestation certifiant que l'agriculteur est actif, au sens de l'article R. 314-109 du code de l'énergie. : non applicable



*Toutes ces conditions sont cumulatives, le projet devra respecter toutes les catégories.

Figure 1 : Synthèse des obligations issues du décret du 8 avril et de l'arrêté du 5 juillet 2024 (Source : Agrosolutions)

¹ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000047298015

2 Description du projet agrivoltaïque

Le projet est situé sur la commune de Saulvaux, dans le département de la Meuse dans la région Grand-Est.

Tableau 1 : Territoire concerné par le projet

Territoire concerné par le projet	
Région	Grand-Est
Département	Meuse
EPCI	Commercy - Void - Vaucouleurs
Petite Région Agricole	Barrois
Commune(s)	Saulvaux

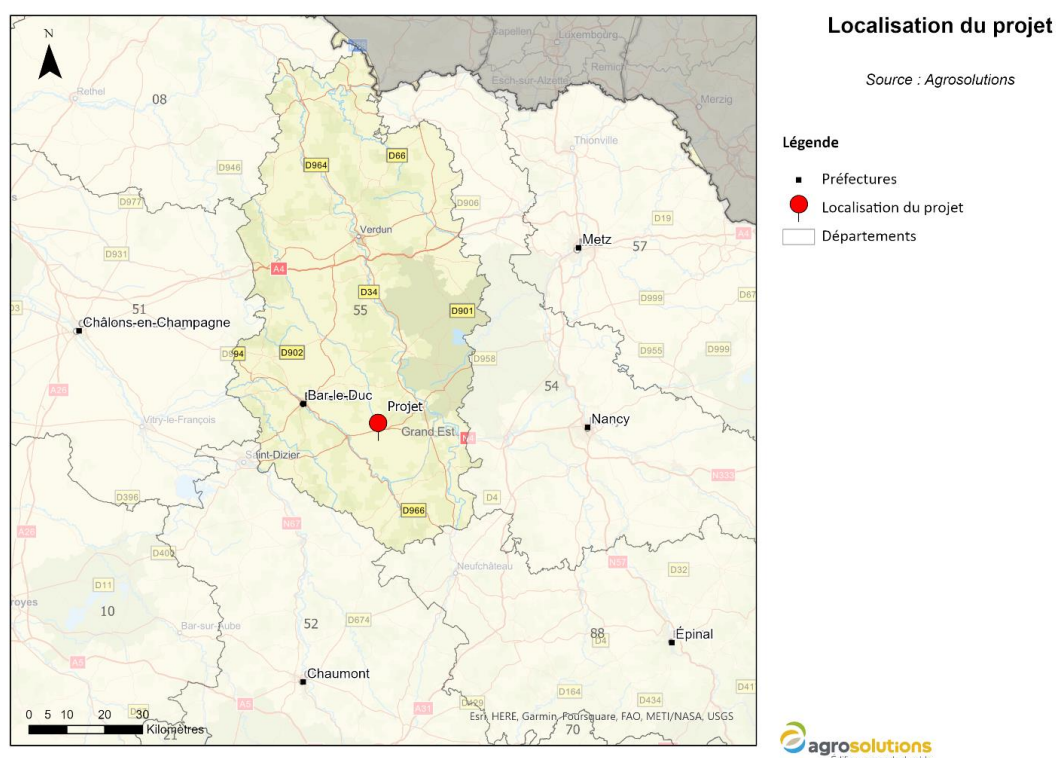


Figure 2 : Carte de la localisation du projet agrivoltaïque de Saulvaux

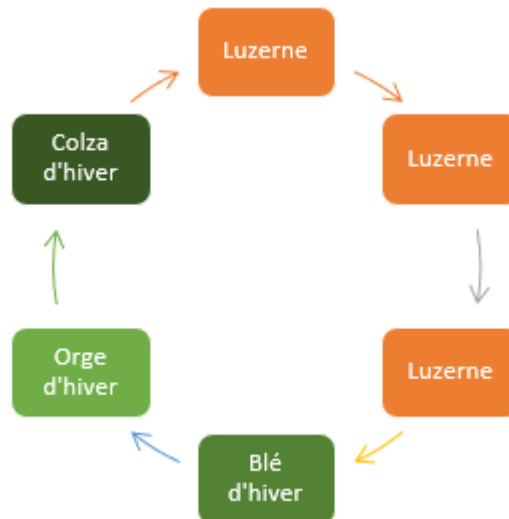
Le projet agrivoltaïque de Saulvaux est un projet porté par Destren Energies. Il porte emprise sur une surface totale agricole de 30,37 ha (zone témoin comprise). La surface d'implantation concerne des parcelles agricoles déclarées à la PAC et exploitées par une exploitation agricole, l'EARL de la Croix Castel, l'exploitant agricole M. COLLIN est propriétaire-exploitant. L'exploitation agricole continuera d'exploiter les parcelles agricoles pendant le projet. Les parcelles sont actuellement conduites en agriculture conventionnelle et exploitées en grandes cultures. Elles seront exploitées selon le même système agricole pendant le projet (production de grandes cultures) avec l'intégration de luzerne dans la rotation pour l'alimentation du cheptel bovin de l'exploitation.

La rotation culturale avant et pendant projet reste proche et évolue ainsi :

Rotation actuelle



Rotation pendant projet



Le matériel de l'agriculteur, les engins agricoles utilisés pour les travaux aux champs, le semis et la récolte, ont guidé l'écartement des rangées de trackers, un inter-rang de 14 mètres de pieu à pieu a donc été retenu. La largeur de travail et donc de production est de 12 m, amenant ainsi une bande enherbée de 1m de chaque côté des pieux (distance de sécurité entre engins agricoles et pieux). La culture mise en place annuellement ainsi que son mode de conduite et les bandes enherbées seront bien identiques quel que soit l'inter-rang, la parcelle formera une unité agricole.

Le plan de masse ci-dessous présente le plan d'implantation des rangées de panneaux. Certaines zones trop enclavées ou de trop forte pente ont été évitées. Par ailleurs, les panneaux trackers sont classiquement implantés selon un axe Nord-Sud, afin de respecter le sens de travail de l'agriculteur par rapport à la pente présente sur la parcelle, les rangées ont été légèrement décalées vers l'Ouest.

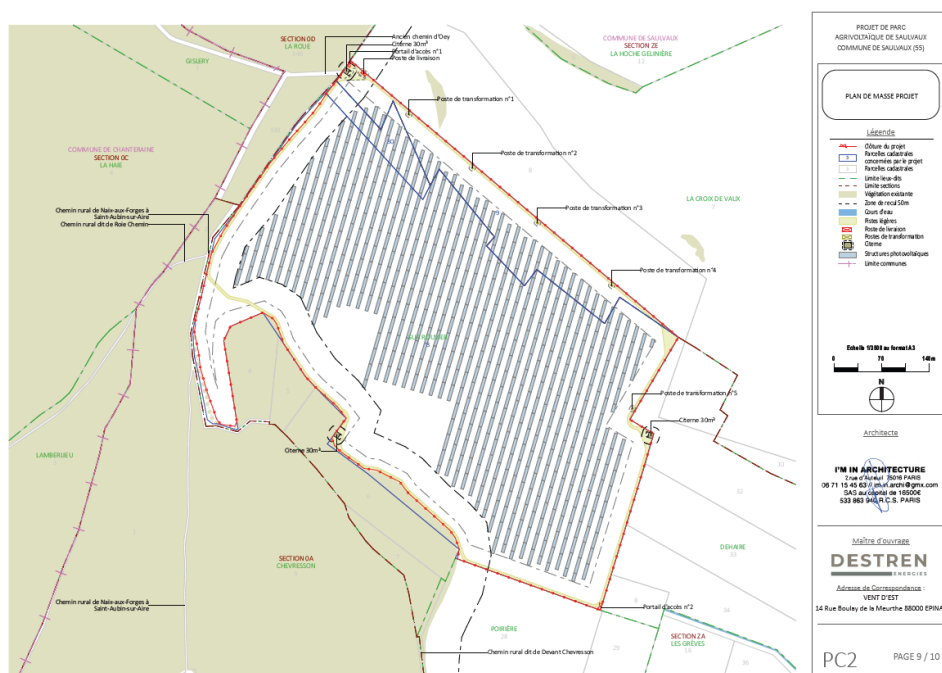


Figure 3 : Plan de masse du parc agrivoltaïque du projet de Saulvaux, source : Destren Energies

3 Description physique de la parcelle

Article R.314-108 du code de l'énergie :

La parcelle agricole à considérer pour l'application de l'article L.314-36 correspond à un **périmètre présentant les mêmes caractéristiques agricoles**, supportant un projet d'installation agrivoltaïque et **déterminé par les limites physiques d'une implantation continue de panneaux photovoltaïques**. Il peut être d'une superficie différente de celle de la parcelle considérée par le cadastre ou de la parcelle délimitée dans les conditions fixées à l'article D.614-32 du code rural et de la pêche maritime sur laquelle est réalisé le projet.

Le projet concerne 3 parcelles cadastrales. Elles portent les identifiants cadastraux ZA3, ZA30 et ZE9 et sont toutes situées sur la commune de Saulvaux. Elles sont entièrement incluses dans la zone d'emprise du projet. **Les parcelles agricoles, déclarées au Registre Parcellaire Graphique (RGP) ou bien constitutives d'un ensemble géométriquement cohérent, peuvent posséder des contours légèrement différents des parcelles cadastrales.** Elles sont ici également au nombre de 1 selon l'entretien réalisé avec l'exploitant agricole de l'EARL de la Croix Castel. Leur organisation est précisée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Description des parcelles agricoles impactées par le projet

Identifiant cadastral	Surface totale (ha)	Surface impactée par le projet (ha)	Usage agricole avant projet	Zonage urbanistique	Nom de l'exploitation agricole exploitant la parcelle avant projet
ZA3	27,36	27,36	Cultures céréalières	RNU	EARL de la Croix Castel
ZA30	0,709	0,709			
ZE9	2,837	2,837			

Le plan ci-dessous détaille respectivement la localisation et l’emprise des parcelles cadastrales. La zone témoin sera incluse dans l’emprise du projet sur la parcelle ZA3.

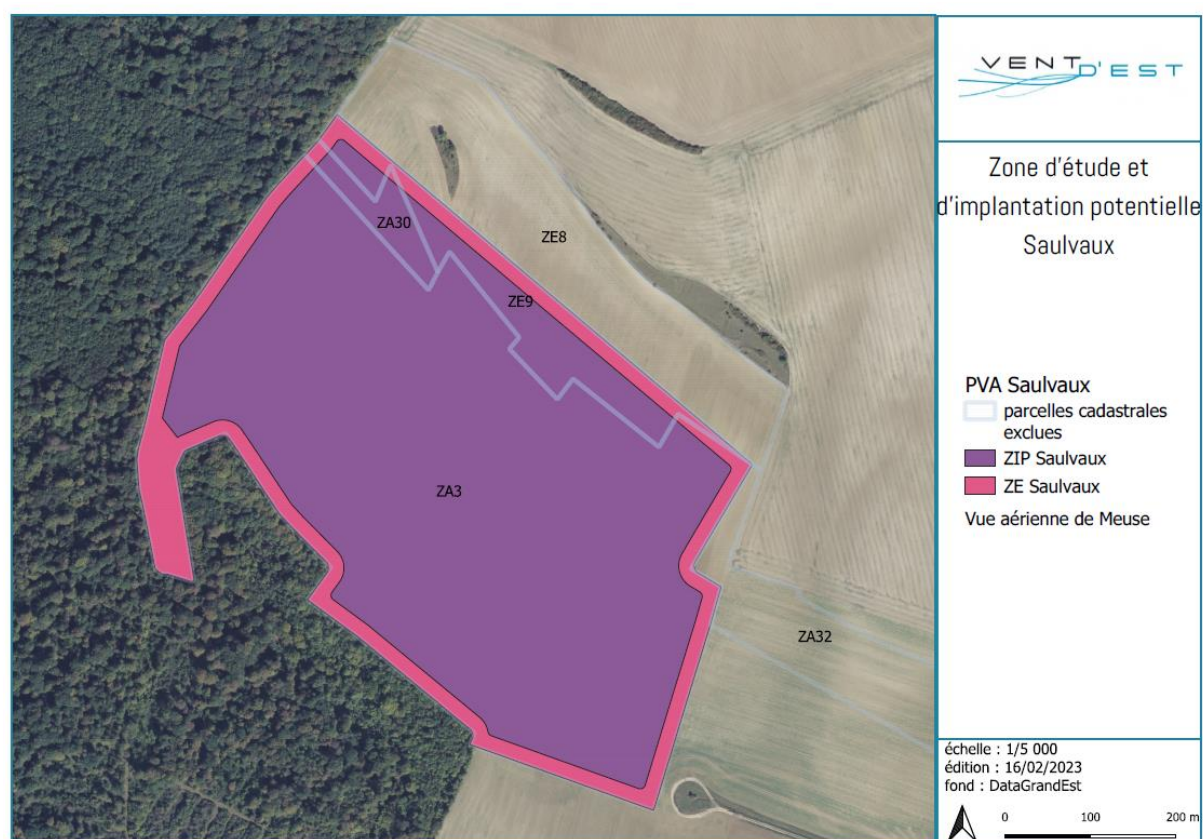


Figure 4 : Carte de l’emprise du projet sur les parcelles cadastrales et agricoles (source : Vent d’Est)

Une étude de sol a été réalisée par le laboratoire Sol &co et permet de confirmer la faible valeur agronomique des parcelles (Annexe 4)

Les résultats pédologiques mettent en exergue des **sols peu profonds** constitués d’un ou deux horizons distincts. Plusieurs sondages ne mettent en avant qu’un seul horizon du fait d’un refus de tarière causé par les teneurs en argiles très élevées. On note par ailleurs la **présence importante en surface de cailloux et de pierres**.

De manière générale, la **texture est peu équilibrée** le long du profil de sol (horizons H1 et H2) du fait des teneurs très élevées en argiles, impliquant une **mauvaise stabilité structurale**. Cependant, les argiles

sont naturellement « riches » en éléments nutritifs et présentent de bonnes propriétés de rétention en eau.

Néanmoins, la forte teneur en argiles affecte négativement le potentiel pédologique des sols, les rendant **difficiles à travailler**, compacts et de faible porosité, ce qui limite les échanges gazeux et la circulation des nutriments via la solution du sol.

En plus de ces horizons argileux et compacts, une **abondance d'éléments grossiers** (particules dont la taille est supérieure à 2 mm) en surface est observée. Ces éléments sont calcaires et principalement de grande taille, pouvant atteindre une taille d'une vingtaine de centimètres.

Le potentiel pédologique évalué est « faible ». En effet, les sols sont peu profonds, possèdent une texture peu équilibrée et trop argileuse. De plus, la structure du sol est relativement compacte.

Concernant la **fertilité agronomique**, les paramètres chimiques sont sensiblement homogènes sur l'ensemble du site et indiquent des sols de pH basiques (pH supérieur à 8). Ces valeurs sont élevées (pH compris entre 8,0 et 8,5), ce qui implique une **biodisponibilité limitée** des éléments nutritifs pour la majorité des essences végétales.

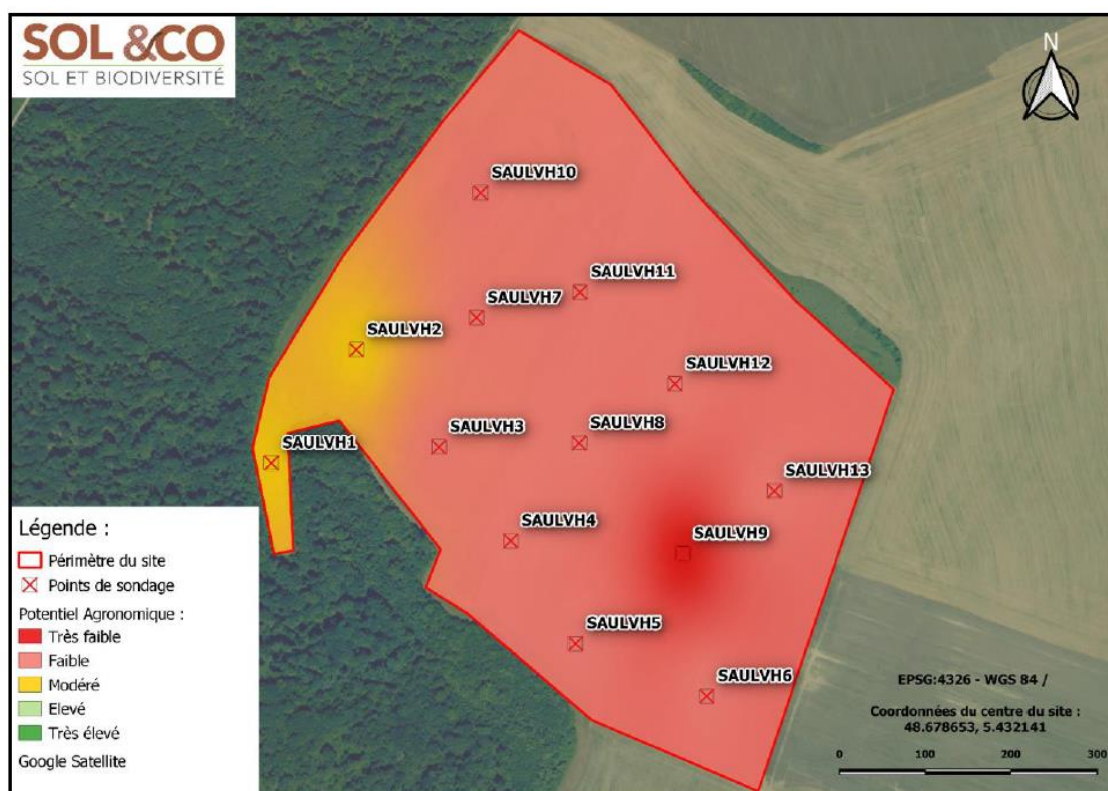


Figure 5 : Cartographie du potentiel agronomique des sols – Sol &co©

4 Services apportés par l'installation photovoltaïque

Un mémoire de synergies agricoles a été réalisé par Agrosolutions grâce au logiciel Optisoleo d'Agrisoleo et à des sources bibliographiques, le rapport complet est disponible en Annexe 1 : Mémoire de synergies agricoles.

La société Agrisoleo, experte dans l'accompagnement des projets de la filière agrivoltaïque, a développé le logiciel de simulation OptiSoleo pour optimiser les choix techniques de prédimensionnement afin de maximiser les bénéfices agronomiques des projets et d'optimiser la synergie de la production agricole et de la production solaire. Optisoleo est le premier logiciel fondé sur la modélisation du microclimat sous les panneaux et l'analyse agronomique pour optimiser et auditer les installations agrivoltaïques. Il utilise la modélisation microclimatique et agronomique afin de :

- ✓ Simuler et évaluer le microclimat induit par les ombrières agrivoltaïques pour tout type de structures (fixes, trackers, trackers piloté),
- ✓ Simuler les impacts agronomiques pour tout type de cultures,
- ✓ Simuler les rendements de productible électrique, en fonction du pilotage des panneaux.

Il permet ainsi d'établir un diagnostic justifié en matière d'utilité agricole, et d'optimiser la synergie installation/culture. La fiabilité reconnue de ses modélisations l'habilité à produire également une évaluation fiable et indépendante de la qualité du projet, nécessaire au dépôt du dossier de demande permis de construire.

Dans le cadre du projet agrivoltaïque de Saulvaux, le mémoire de synergies agricoles répond à la question : quel(s) service(s) apporte(nt) les trackers aux cultures de la rotation ? Il a permis de comparer le système agrivoltaïque mis en place à une zone témoin sans panneaux vis-à-vis du développement des cultures au travers d'indicateurs agro-climatiques.

Le mémoire de synergies agricoles, entièrement disponible en annexe de ce document, sert ainsi à la justification des services apportés par l'installation photovoltaïque et les paragraphes 4.1 à 4.5 suivants synthétisent ces résultats.

4.1 Amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques

Article R.314-110 : Le service d'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques (...) consiste d'une part en :

- Une amélioration des qualités agronomiques du sol
- Et une augmentation du rendement de la production agricole ou, à défaut, au maintien de ce rendement ou au moins à la réduction d'une baisse tendancielle du rendement observée au niveau local
- Peut également être considérée (...) toute installation qui permet une remise en activité agricole ou pastorale d'un terrain agricole inexploité depuis plus de cinq années.

4.1.1 Amélioration des qualités agronomiques du sol et du rendement

Il semble difficile de justifier d'une amélioration du potentiel agronomique du sol grâce à l'installation du système photovoltaïque. Ce sont les pratiques agricoles et non la présence du système photovoltaïque qui permettrait d'améliorer les qualités agronomiques du sol. Le système photovoltaïque ne permettra donc pas d'apporter ce service, et la mise en place du système photovoltaïque ne devrait pas y porter d'atteinte puisque les structures seront implantées avec des pieux battus.

4.1.2 Remise en activité agricole

Le projet de Saulvaux n'est pas concerné par cette catégorie.

4.2 Adaptation au changement climatique

Article R.314-111 : Le service d'adaptation au changement climatique (...) consiste en une limitation des effets néfastes du changement climatique se traduisant :

- Par une augmentation du rendement de la production agricole ou, à défaut, à la réduction, voire au maintien, du taux de la réduction tendancielle du rendement qui est observée au niveau local,
- Ou par une amélioration de la qualité de la production agricole

La limitation des effets néfastes du changement climatique s'apprécie par l'observation de l'un des effets adaptatifs suivants :

- En termes d'**impact thermique**, par la fonction de régulation thermique de la structure en cas de canicule ou de gel précoce ou tardif
- En termes d'**impact hydrique**, par la limitation du stress hydrique des cultures ou des prairies, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par irrigation ou la diminution de l'évapotranspiration des plantes ou de l'évaporation des sols, et par un confort hydrique amélioré
- En termes d'**impact radiatif**, par la limitation des excès de rayonnement direct conduisant notamment à une protection contre les brûlures foliaires.

Le projet agrivoltaïque de Saulvaux va permettre de limiter des effets néfastes du changement climatique ayant des impacts positifs sur le stress thermique et des impacts positifs sur le stress hydrique et l'évapotranspiration des cultures de la rotation du projet.

4.2.1 Limitation de l'impact thermique

Le système agrivoltaïque permet de réduire le nombre de jour de stress thermique des cultures de la rotation pendant projet : blé tendre d'hiver, orge d'hiver, colza et luzerne. En effet, cet indicateur a été analysé sur chaque cycle cultural du semis à la récolte. Le tableau ci-dessous synthétise les résultats par culture et par système agrivoltaïque, et le mémoire de synergies agricoles détaille bien l'ensemble de ces résultats.

	Effet très positif pour la culture
	Effet positif pour la culture
	Effet neutre pour la culture
	Effet légèrement négatif pour la culture
	Effet négatif pour la culture

Tableau 3 : Limitation de l'impact thermique

Stress thermique	Système agrivoltaïque
COLZA	Diminution du nombre de jours de stress thermique, surtout en fin de cycle qui devrait favoriser le remplissage des graines : le colza de la zone témoin est en stress thermique 31 jours vs le colza des systèmes agrivoltaïques est en stress thermique 18 jours.
CEREALES D'HIVER	Diminution du nombre de jours de stress thermique, surtout en fin de cycle qui devrait favoriser le remplissage des grains : les céréales de la zone témoin est en stress thermique 31 jours pour le blé et 25 jours pour l'orge vs les céréales des

	systèmes agrivoltaïques sont en stress thermique 19 jours pour le blé et 16 jours pour l'orge
LUZERNE	Diminution du nombre de jours de stress thermique permettant de maintenir plus longtemps la croissance du couvert: le luzerne de la zone témoin est en stress thermique 34 jours vs le luzerne des systèmes agrivoltaïques est en stress thermique 19 jours.

4.2.2 Limitation de l'impact hydrique

Le système agrivoltaïque permet également de réduire le stress hydrique des cultures de la rotation pendant projet : blé tendre d'hiver, orge de printemps semé hiver, colza et luzerne. Un ensemble d'indications ont été étudiés sur chaque cycle cultural du semis à la récolte pour analyser le stress hydrique : évapotranspiration, réserve utile en eau du sol et le nombre de jours de stress hydrique directement. Ce stress est réduit comme le synthétise le tableau ci-dessous, et le mémoire de synergies agricoles détaille l'ensemble de ces résultats.

	Effet très positif pour la culture
	Effet positif pour la culture
	Effet neutre pour la culture
	Effet légèrement négatif pour la culture
	Effet négatif pour la culture

Tableau 4 : Limitation de l'impact hydrique

	Système agrivoltaïque
COLZA	
ETP	Diminution de l'évapotranspiration Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Stress hydrique	Diminution du nombre de jours de stress hydrique.
CEREALES	
ETP	Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Stress hydrique	Diminution du nombre de jours de stress hydrique.
LUZERNE	
ETP	Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Stress hydrique	Diminution du nombre de jours de stress hydrique

4.2.3 Limitation de l'impact radiatif

En termes d'impact radiatif, par la limitation des excès de rayonnement direct conduisant notamment à une protection contre les brûlures foliaires, ce service n'est pas directement visé pour des productions agricoles de grandes cultures. En effet, ce n'est pas ce qui va être le facteur le plus limitant sur la zone du projet. En revanche, les indicateurs d'irradiance et d'hétérogénéité des rayonnements ont bien été étudiés dans le cadre du mémoire de synergies agricoles du projet car cela peut avoir un impact sur le rendement. Le système agrivoltaïque forcément un ombrage plus important pour les cultures et une hétérogénéité des rayonnements au niveau des inter-rangs selon la position du tracker et la position du soleil.

Concernant l'impact des panneaux sur l'irradiance et sur l'hétérogénéité des rayonnements perçus par les cultures (colza, luzerne et céréales) comme c'est attendu, il est plutôt négatif et ce, dans le cas où les panneaux sont en full tracking solaire (hypothèse retenue dans les modélisations).

En synthèse, afin de limiter l'impact de l'ombre sur les cultures et optimiser le passage lumineux, il faudrait pouvoir piloter les panneaux selon les besoins des cultures par stade. La modélisation a été effectuée en « full tracking solaire » : si lors des premières années de projet, il est observé une baisse de rendement qui peut s'expliquer par un ombrage plus important entraîné par la présence des panneaux et ayant exclu d'autres facteurs pouvant impacter le rendement, il faudra alors optimiser le pilotage des panneaux en cours du projet. Les impacts de l'ombrage par culture sont détaillés ci-dessous. Cependant sur la zone projet, la présence d'ombrage permettant fortement de réduire l'impact hydrique qui est le principal facteur limitant pour la production agricole, il ne sera peut-être pas nécessaire d'adapter la rotation des panneaux.

Concernant le colza :

Il est important de noter qu'il n'existe actuellement pas d'étude avec des résultats rendements publiés sur du colza menée en agrivoltaïsme. Une seule étude en France a été menée sur du colza (Brunel-Muguet, S., 2013) avec une réduction d'irradiance de 43% de la floraison à la maturation en serre. L'ombrage a induit un développement plus important des feuilles sur la tige principale et les ramifications pour optimiser la captation de la lumière. Le rendement n'a pas été mesuré mais la biomasse des siliques était identique entre le témoin et la modalité avec ombrage en fin de cycle. Toutefois l'expérimentation n'ayant pas été menée au champ, les résultats ne sont pas généralisables. Les premiers projets mis en place permettront d'améliorer les connaissances sur l'impact de l'ombrage sur le colza et d'adapter la rotation des panneaux en fonction des besoins de la culture.

Concernant les céréales d'hiver :

Il est important de noter qu'il existe actuellement peu de référence sur l'impact de l'ombrage sur le blé et sur l'orge et que les sources existantes sont dans des zones pédoclimatiques différentes de celles du projet, ainsi que des choix techniques différents. En effet, il n'existe pas de suivis réalisés sur des grandes cultures avec trackers surélevés (cf. tableau ci-dessous).

Cependant, en conditions plutôt sèches, une amélioration des rendements est constatée avec la présence d'ombrage alors qu'en bonnes conditions de potentiel de rendement et en climat plutôt humide, l'effet est plutôt négatif.

Par ailleurs, il est important de mentionner que toutes les variétés ne répondent pas de la même manière à la présence d'ombrage, certaines sont plus tolérantes que d'autres, le choix variétal sera donc essentiel dans les projets agrivoltaïques et demande un travail d'approfondissement des connaissances sur les variétés.

En fonction des retours d'expérience sur les démonstrateurs déjà en place, une adaptation de la rotation des panneaux à certains stades de la culture pourra être mise en place.

Tableau 5 : Impact de l'ombrage sur la culture du blé et sur la culture de l'orge

Localisation culture	Allemagne <i>Blé tendre</i>	Belgique Blé tendre de printemps et d'hiver	France Blé (Sensas) Orge (Amistar)	France Blé (complice)	Espagne Blé (9 variétés) Orge (9 variétés)
Type de panneaux	Ombrières Hauteur : 5 mètres	Ombrières Hauteur : 5 mètres / inter-rang : 13 m	Panneaux verticaux	Panneaux verticaux	Sous serre avec voile d'ombrage
Taux d'ombrage	Lumière disponible : 60 % du PAR	30%	14%	18%	10% et 50%

Rendements	$\searrow$ 18,7% en 2017 $\nearrow$ 2,7% en 2018 (année chaude et sèche) $\searrow$ 8% en moyenne sur les deux années et 8% de perte de surfaces exploitées $\approx$ Pas de réduction significative sur les rendements en année chaude et sèche <i>Rendement du témoin : 57 q/ha en 2017, 46 q/ha en 2018 (site conduit en agriculture biologique)</i>	$\searrow$ 33% en 2022 pour le blé de printemps (-1,7 t/ha en zone forte irradiance et - 1,5 t/ha en zone faible irradiance $\searrow$ 46% en 2023 pour le blé d'hiver (-1,7 t/ha en zone forte irradiance et - 1,4 t/ha en zone de faible irradiance Avec une perte de surface exploitées de 8% et un sol compacté à cause des travaux de construction <i>Rendement du témoin : 46 q/ha en 2022, 36 q/ha en 2023</i>	$\nearrow$ 10% pour le blé $\nearrow$ 8% pour l'orge Rendement du témoin : 19 q/ha en blé et 20 q/ha en orge (site conduit en agriculture biologique)	$\nearrow$ 15% de rendement Rendement du témoin : 29 q/ha	$\nearrow$ 19% pour le blé et $\nearrow$ 2% pour l'Orge à 10% d'ombrage $\nearrow$ 19% pour le blé et $\nearrow$ 19% pour l'Orge à 50% d'ombrage Importantes différences variétales : sur le blé, 7 variétés sur 9 présentent une amélioration de rendement à 50% de diminution d'irradiance avec jusqu'à 10 q/ha de plus <i>Rendement du témoin : 28 q/ha en blé et 30 q/ha en orge</i>
Qualité de la production	$\searrow$ Diamètre des grains sous panneaux en 2018 $\searrow$ PMG les 2 années sous panneaux $\nearrow$ Hauteur du couvert sous panneaux $\searrow$ Retard de croissance non significatif en 2018 invisible à la récolte	$\approx$ Stabilisation de la qualité des grains, la teneur en protéines et la morphologie des plantes sous les panneaux les 2 années $\searrow$ 17% nombre de grains par épi en 2022 (non significatif) $\nearrow$ 12% nombre de grains par épi en 2023 (non significatif)	$\nearrow$ 2,8% du poids de mille grains pour l'orge Possible $\nearrow$ du taux de protéines, pour l'orge, niveau maintenu pour le blé	$\nearrow$ de la taille des plantes dans la zone AgriPV par rapport à la zone ombragée	

Concernant le luzerne :

Il est important de noter qu'il n'existe actuellement qu'une seule avec des résultats de rendements publiés sur de la luzerne menée en agrivoltaïsme (Edouard, 2022) avec une réduction d'irradiance comprise entre 37 et 48% en fonction des zones. Sur le site un gain de rendement moyen de 10% en moyenne sur 2 ans a été constaté. Les premiers projets mis en place permettront d'améliorer les connaissances sur l'impact de l'ombrage sur la luzerne et d'adapter la rotation des panneaux en fonction des besoins de la culture.

Tableau 6 : Impact de l'ombrage sur la culture du luzerne

Localisation	Type de panneaux	Taux d'ombrage	Rendements	Qualité de la production
France (77)	Ombrières Trackers bi-axial	Entre 37 et 48% de perte d'irradiation (taux de couverture de 37%)	↘ 21% en 2021 ↗ 40% en 2022 (année chaude et sèche) ↗ 10% en moyenne sur les deux années <i>Effet positif de réduction des périodes de stress thermique et de gel printanier selon les auteurs</i>	Pas d'analyse qualité. Augmentation de la surface des feuilles et élongation pour s'adapter au manque de lumière.

Ainsi, le système agrivoltaïque n'apportera pas de bénéfices sur l'impact radiatif pour les grandes cultures de la rotation. Mais l'hypothèse retenue est qu'il n'entraînera pas d'atteinte substantielle au rendement ou du moins une attente limitée qui pourra s'atténuer grâce à une optimisation du pilotage des trackers.

4.3 Protection contre les aléas

Article R.314-112 : Le service de protection contre les aléas climatiques (...) s'apprécie au regard de la protection apportée par les modules agrivoltaïques contre au moins une forme d'aléa météorologique, ponctuel et exogène à la conduite de l'exploitation et qui fait peser un risque sur la quantité ou la qualité de la production agricole, à l'exclusion des aléas strictement économiques et financiers.

Concernant le projet agrivoltaïque de Saulvaux, les deux aléas climatiques rencontrés et posant actuellement des problèmes à l'agriculteur du projet sont les suivants :

- Sécheresse
- Coup de chaud, forte chaleur

Il s'agit des deux aléas climatiques arrivant généralement en parallèle l'un de l'autre et lors des stades les plus sensibles des cultures de la rotation : floraison, remplissage des grains et maturation.

Ces deux aléas climatiques sont directement liés aux indicateurs analysés pour évaluer du service d'adaptation au changement climatique dans le paragraphe ci-dessus. Ainsi, les conclusions sont les mêmes et vont en faveur d'une protection contre les aléas climatiques pour les cultures de la rotation grâce au système agrivoltaïque mis en place.

4.4 Amélioration du bien-être animal

Article R.314-113 : Le service d'amélioration du bien-être animal (...) s'apprécie au regard de l'amélioration du confort thermique des animaux, démontrable par l'observation :

- D'une diminution des températures dans les espaces accessibles aux animaux à l'abri des modules photovoltaïques
- Et par l'apport de services ou de structures améliorant les conditions de vie des animaux

Le projet de Saulvaux n'est pas concerné par ce service étant donné qu'il s'agit d'un projet de grandes cultures uniquement.

4.5 Synthèse des services rendus par le projet d'installation agrivoltaïque de Saulvaux

Pour conclure, le projet d'installation agrivoltaïque à Saulvaux respecte les exigences légales et les services demandés. D'après les modélisations effectuées, il permet de conjuguer production d'énergie renouvelable et maintien d'une activité agricole durable. Les analyses et simulations présentées démontrent que le système agrivoltaïque mis en place sur les parcelles agricoles de Saulvaux a bien des effets bénéfiques sur les cultures de la rotation du projet selon l'analyse de plusieurs indicateurs agro-climatiques. L'intensité des bénéfices apportés par les trackers varient pour chaque culture et sont propres à chacune.

Le tableau suivant synthétise les services rendus :

Tableau 7 : Services apportés aux productions agricoles par le projet agrivoltaïque de Saulvaux

Services	Projet agrivoltaïque de Saulvaux
L'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques	Pas d'atteinte limitée ou substantielle Le potentiel agronomique du sol ne sera a priori pas impacté avec la mise en place de pieux battus
L'adaptation au changement climatique	Service rendu par l'installation Dans un contexte d'augmentation des températures et de l'évapotranspiration, la présence de panneaux permettra de limiter les températures et de conserver l'eau plus longtemps dans le sol pour imiter le stress hydrique des plantes
La protection contre les aléas	Service rendu par l'installation Protection contre les températures extrêmes et contre les sécheresses.
L'amélioration du bien-être animal	Non concerné

Ainsi, le projet agrivoltaïque de Saulvaux répond aux critères définis par la loi d'Accélération de la Production d'Energies Renouvelables et les décrets associés, tout en apportant des bénéfices significatifs à la production agricole.

5 La production agricole est l'activité principale de la parcelle agricole

Article R.314-118 : Pour garantir que la production agricole est l'activité principale (...) une installation agrivoltaïque doit satisfaire les deux conditions suivantes :

- La superficie qui n'est plus exploitable du fait de l'installation agrivoltaïque n'excède pas 10% de la superficie totale couverte par l'installation agrivoltaïque
- La hauteur de l'installation agrivoltaïque ainsi que l'espacement inter-rangées permettent une exploitation normale et assurent notamment la circulation, la sécurité physique et l'abri des animaux ainsi que, si les parcelles sont mécanisables, le passage des engins agricoles
- De plus, pour les installations de 10 MWc dont la technologie agrivoltaïque n'est pas éprouvée par arrêté des ministres chargés de l'énergie et de l'agriculture, le taux de couverture n'excède pas 40%.

5.1 Superficie non exploitable

La surface non exploitable au sein de la surface clôturée (pistes, postes de livraison et de transformation, pieux, citerne) est de 3,51% à l'échelle de la surface clôturée et de 5,52% en considérant uniquement la surface de la zone continue de panneaux. A noter que les pistes sont au sein de la zone clôturée mais pas au niveau de la zone d'implantation des panneaux (piste au niveau de la clôture), il semble donc plus pertinent de prendre en compte le taux de surface non exploitable à l'échelle de la surface clôturée soit de 3,51%.

Tableau 8 : Calcul de la surface non exploitable

Synthèse des surfaces		
Surface clôturée (A)	30,37	ha
Surface continue de panneaux (B)	19,40	ha
Surface des pistes non exploitables (D)	10 473	m ²
Surface du bâti (postes de transformation et livraison, pieux et citerne) (E)	195	m ²
Surface non exploitable (F) = (D) + (E)	1,07	ha
Option 1 : Taux de surface non exploitable (G) = (F) / (A)	3,51	%
Option 2 : Taux de surface non exploitable (H) = (F) / (B)	5,52	%

Ainsi, la superficie qui n'est plus exploitable du fait de l'installation agrivoltaïque est inférieure à 10 % de la superficie totale couverte par l'installation agrivoltaïque.

Les bandes enherbées s'étendront sur 2,75 ha avec 1 m de bande enherbée de chaque côté des rangées de pieux. Il est prévu de semer ces bandes avec un couvert (mélange fétuque, brome, trèfle) et de les valoriser en tant que jachère avec un broyage annuel. A noter que cette bande en jachère est essentielle afin de maintenir une distance de sécurité suffisante entre les engins agricoles de grandes dimensions utilisés en grandes cultures et les pieux. Ainsi, elles n'ont pas été comptabilisées dans la surface agricole non exploitable.

5.2 Adaptation du parc à l'activité agricole

Les panneaux photovoltaïques mis en place seront des trackers dont le plan de coupe est présenté ci-après. En position horizontale, la hauteur du panneau, à son point le plus bas, est de 2,7 mètres et dans son axe de rotation le plus incliné, le point le plus bas du panneau est de 1,10 mètres. La largeur d'une table est de 4,49 mètres.

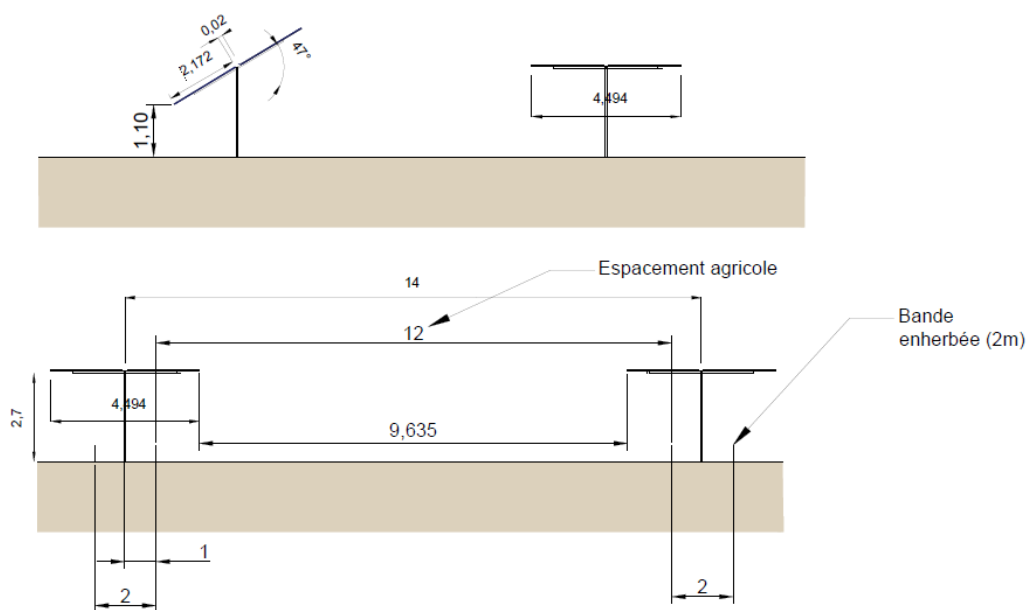


Figure 6 : Plan de coupe d'un tracker, source : Destren Energies

Les deux schémas ci-dessous précisent les largeurs de bandes cultivées (cultures), de travail pour l'agriculteur avec ses engins agricoles et de bandes enherbées au pied des trackers selon la largeur de l'inter-rang, qui a été défini spécifiquement selon le matériel agricole détenu par l'agriculteur. La largeur de la bande enherbée au pied des trackers est de 1 m de chaque côté des pieux, largeur permettant aux engins agricoles d'être utilisés sans risque vis-à-vis des panneaux et laissant une marge de manœuvre à l'agriculteur. C'est une largeur qui a été demandée par l'agriculteur et qui répond à son besoin.

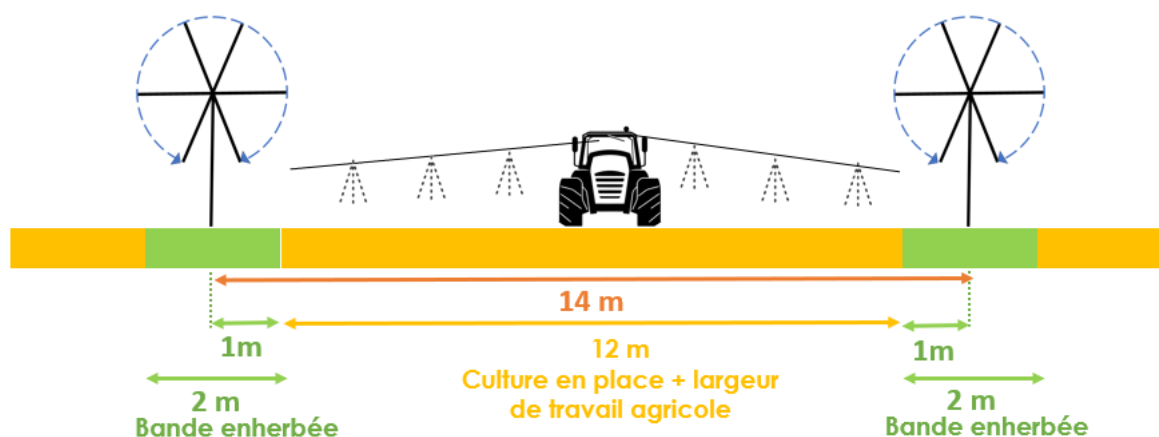


Figure 7 : Plan de l'inter-rang de 14 m

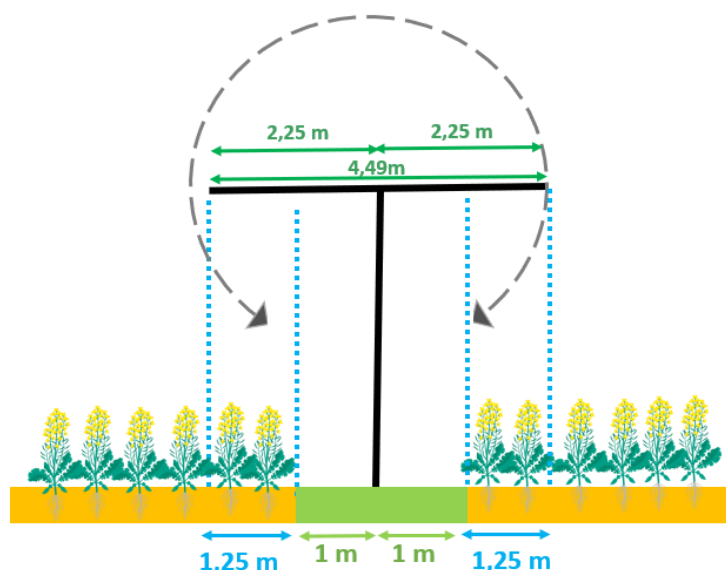


Figure 8 : Localisation de la zone cultivée par rapport à la rotation des panneaux

Lors des passages d'engin agricole lors des différents chantiers, les trackers pourront être pilotés et ainsi bridés si nécessaire.

Ainsi, selon la largeur de 1 m de la bande enherbée au pied des rangées de panneaux et la largeur de 4,49 m d'une table, lorsque les tables seront en position horizontale, 1,25 m de la culture sera présente directement sous le panneau comme le montre le schéma ci-dessus.

5.2.1 Hauteur du bas de panneaux

Tableau 9 : Hauteur du bas de panneaux

Hauteur du bas de panneaux à l'angle maximal de rotation	1,1 m
Hauteur du bas de panneaux en position horizontale	2,7 m

La technologie utilisée pour les panneaux photovoltaïques repose sur un système de trackers montés sur des pieux battus en implantation monopieux. Le bas de panneaux sera à une hauteur minimale de 1,1 m.

Grâce au système de tracking, pilotable, les panneaux peuvent être bridés en fonction des cultures. Cela sera notamment nécessaire lors de la présence du colza. En effet, le colza atteint une hauteur maximale d'environ 1,5 m en fin de cycle, soit une hauteur supérieure à la hauteur du bas de panneaux non bridés de 1,1 m. Le pilotage des panneaux sera adapté pendant le cycle de la culture.

En termes de hauteur de bas de panneaux non bridés, cela ne sera pas problématique pour le blé tendre d'hiver, l'orge de printemps semé hiver et le luzerne dont les hauteurs maximale en fin de cycle de sont d'environ 1 m.

5.2.2 Ecartement des rangées de panneaux

Tableau 10 : Ecartement des rangées de panneaux

Ecartement de pieu à pieu	14 m
---------------------------	------

Ces deux largeurs d'inter-rangs ont été définies selon le matériel détenu sur l'exploitation de l'EARL de la Croix Castel pour ne pas nécessiter de nouveaux investissements et réellement s'adapter à des engins agricoles classiques. Ainsi un écartement de 14 m pour une largeur travaillée de 12 m a été choisie. Le renouvellement de matériel sera ainsi également simplifié avec des outils de taille standard de 12 m, 6 m, 4 m ou 3 m qui pourront être utilisés dans l'inter-rang sans que les surfaces de travail se superposent.

Toutes les opérations réalisées avant le projet agrivoltaïque et nécessaires à l'activité agricole restent possibles et pour la plupart, non impactées par l'installation agrivoltaïque en respect du décret n° 2024-318 du 8 avril 2024 et l'arrêté relatif aux contrôles du 5 juillet 2024.

5.3 Taux de couverture

Art. R. 314-119 : Le taux de couverture d'une installation agrivoltaïque est défini comme le rapport entre, d'une part la **surface maximale projetée au sol des modules photovoltaïques** sur le périmètre mentionné à l'article R. 314-108 dans des conditions normales d'utilisation et, d'autre part, **la surface de la parcelle agricole** définie à l'article R. 314-108.

Le taux de couverture est donc calculé de la façon suivante :
$$\frac{\sum \text{Surfaces } A_i}{\text{Surface } B}$$

A_i étant pour chaque rangée de panneaux, la surface maximale projetée au sol

- Pour des panneaux fixes, la surface maximale projetée au sol est la surface projetée au sol à l'azimut
- Pour des panneaux dynamiques, la surface maximale projetée au sol est la surface des panneaux

B étant la limite physique d'une implantation continue de panneaux, soit l'emprise restreinte délimitée autour des zones continues de panneaux

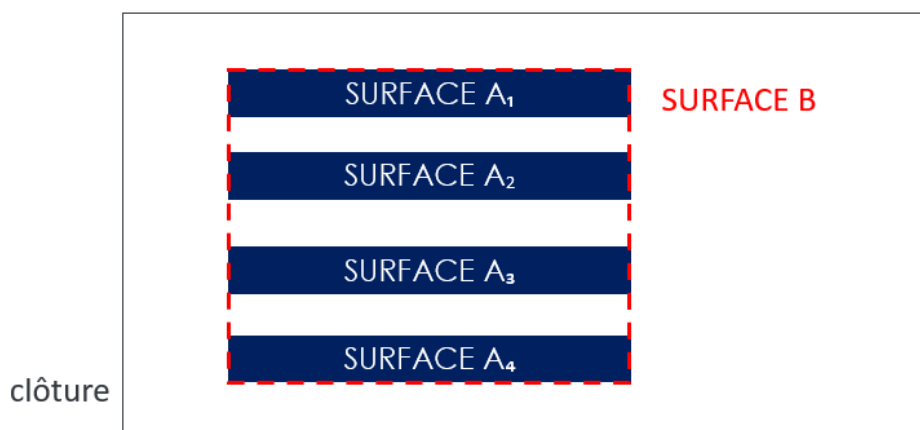


Figure 9 : Schéma de la méthode de calcul du taux de couverture

La surface projetée au sol des modules est égale à 6,06 ha, et la surface continue de panneaux est de 19,40 ha. Ainsi, le taux de couverture est de 31,3 %.

Tableau 11 : Calcul du taux de couverture du projet

Calcul du taux de couverture	
Surface maximale projetée au sol des modules photovoltaïques (Surfaces A _i)	6,06 ha
Surface de la zone continue de panneaux (Surface B)	19,4 ha
Taux de couverture	31,3 %

Ainsi, les deux taux de couverture du projet est bien inférieur à 40 %. Il est de 31,3 % pour la zone agrivoltaïque.

6 Significativité de la production agricole et du revenu de l'exploitant agricole

6.1 Significativité de la production agricole

Article R.314-116 : Pour les installations agrivoltaïques en grandes cultures, le caractère significatif de l'activité agricole peut être notamment apprécié au regard :

- Du rendement
- De la qualité des productions végétales

Aucune ressource bibliographique ou référence locale n'existe aujourd'hui reprenant le même contexte pédoclimatique du projet de Saulvaux et associant des panneaux de type trackers dans un système agricole de grandes cultures. Ainsi, sans étude bibliographique ou références issues directement de projet similaire en fonctionnement, il reste compliqué d'émettre des hypothèses sur le futur rendement des productions agricoles ainsi que leur qualité. Le logiciel de modélisation agronomique utilisé dans le cadre du mémoire de synergies agricoles, Optisoleo, ne permet pas aujourd'hui de modéliser le rendement des grandes cultures. Il fonctionne uniquement avec des indicateurs agro-climatiques.

Ainsi, actuellement, il n'est pas possible d'affirmer que le rendement sera à minima maintenu ou que les pertes potentielles de rendement seront de 10% au maximum avec les systèmes agrivoltaïques.

Un protocole expérimental de suivi agronomique et pédoclimatique sera mis en place dès la mise en service de l'installation, permettra justement d'acquérir des références agronomiques et techniques sur ce type de projet agrivoltaïque. Les références par culture s'acquerront au fil des ans, soit au fil de la rotation culturale.

Comme évoqué dans le paragraphe des services apportés par l'installation photovoltaïques aux cultures, le stress thermique comme hydrique seront en parallèle diminué pour chacune des cultures de la rotation. De plus, le sol présente un faible potentiel agronomique et est très sensible aux aléas sécheresse. Selon ces éléments, il est attendu que le rendement soit à minima maintenu voire augmenté pour le colza, la luzerne et les céréales d'hiver. Le seul facteur limitant au rendement de ces cultures pourrait être la perte d'irradiance et l'hétérogénéité des rayonnements entraînées par les trackers. Cela pourra être optimisé avec le pilotage des trackers et a affiné en cours de projet.

6.2 Revenu durable de l'exploitant agricole

Art. R. 314-117 : Le revenu issu de la production agricole est considéré comme durable lorsque la moyenne des revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole après l'implantation de l'installation agrivoltaïque n'est pas inférieure à la moyenne des revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole avant l'implantation de l'installation agrivoltaïque, en tenant compte de l'évolution de la situation économique générale et de

l'exploitation, selon des modalités définies par arrêté. Une diminution plus importante peut être acceptée par le préfet du département, en raison d'événements imprévisibles et sur demande dûment justifiée.

Dans le cas de l'installation d'un nouvel agriculteur, le revenu est considéré comme durable par comparaison avec les résultats observés pour d'autres exploitations du même type localement.

Pour l'application de l'article R. 314-115, les revenus issus de la vente des productions végétales et animales de l'exploitation agricole sont calculés sur la base d'un excédent brut d'exploitation, diminué des revenus issus de l'installation agrivoltaïque. Durant les cinq premières années de vie de l'installation agrivoltaïque, la moyenne de ces revenus est calculée comme la moyenne des revenus depuis l'achèvement de l'exploitation. Passé ce délai, elle est calculée comme la moyenne des revenus sur les cinq dernières années, en excluant la valeur la plus élevée et la valeur la plus faible.

Le revenu agricole est calculé de la manière suivante :

$\text{Revenu agricole} = \text{EBE (1)} - [\text{revenus directs et indirects liés à l'installation agrivoltaïque}] \text{ (2)}$ $+ [\text{rémunération du travail et cotisations associées}] \text{ (3)}$

- (1) EBE = Chiffre d'affaires + Subventions d'exploitations (PAC) + Indemnités assurances – Consommations intermédiaires – Fermage – Impôts & Taxe – Charges de personnel – Primes d'assurance
- (2) Loyers et indemnités de l'agriculteur pendant l'exploitation de l'installation agrivoltaïque non pris en compte
- (3) Vérification que l'agriculteur ne diminue pas sa rémunération sur l'exploitation agricole

L'exploitant agricole n'a pas souhaité fournir ses comptes de résultats, une étude de l'impact du projet sur l'EBE actuel de l'exploitation et son revenu n'a pas pu être effectuée.

Le porteur de projet versera un montant d'environ 500 €/ha/an à l'exploitation agricole au titre du **travail et des cotisations associées**, donc environ 15 000 € au total annuellement. L'exploitant se versera un salaire plus élevé qu'actuellement, ce qui augmentera son revenu agricole.

Par ailleurs, sans prise en compte de ce revenu agricole, le projet impactera 30,37 ha de SAU dont 26,55 ha continueront d'être exploités en grandes cultures sur une SAU totale de 258,4 ha. Ainsi seuls 3,82 ha ne seront plus valorisés en grandes cultures, soit 1,5% de la SAU de l'exploitation. Le projet devrait donc avoir un effet négligeable sur l'EBE de l'exploitation et positif sur la rémunération du travail, permettant ainsi de garantir un revenu durable.

Cela sera vérifié pendant la durée du projet par le suivi effectué.

7 Attestation certifiant que l'agriculteur est actif



Reims, le 07 novembre 2024

Cotisations non salariées
Cotisations des Non Salariés

Dossier suivi par : Anne-Lise Dumont
Contact téléphonique : 0969366052
Dossier : 33262797500029 (NS03)
EARL DE LA CROIX CASTEL

* ATTESTATION *

Je soussigné, Directrice de la Mutualité Sociale Agricole Marne, Ardennes, Meuse certifie
que parmi les superficies retenues au compte exploitant de :

EARL DE LA CROIX CASTEL
7 RUE SIMON MICHEL
55000 RESSON

figurent les parcelles désignées ci-après ;

COMMUNE	SECTION / PLAN	SUPERFICE	DEPUIS LE
RESSON	ZC0066	00ha20a50ca	01/01/2016
SAULVAUX	ZA0003	27ha26a10ca	01/01/2017
SAULVAUX	ZA0030	00ha70a90ca	01/01/2017
SAULVAUX	ZE0009	2ha83a70ca	01/01/2017

Observations : Mr COLLIN Philippe et son épouse COLLIN Laurence sont propriétaires des parcelles sus-citées. Mr COLLIN Philippe est gérant de l'EARL.

Délivrée à l'intéressé sur sa demande, le 07/11/2024.

P/ le Directeur
Le Responsable de Service,

MSA Marne Ardennes Meuse
24, bd Roederer - CS 30001
51077 Reims Cedex

N° Cristal : 09 69 32 35 62
(appel non surtaxé)

marne-ardennes-meuse.msa.fr

folio :

8 Annexe 1 : Mémoire de synergies agricoles

Note technique justifiant les services rendus par le projet agrivoltaïque de Saulvaux (55)

Version du 19/12/2024

Rédacteurs : Pierre-Antoine MIRALLIÉ et Alizée LOISEAU

SOMMAIRE

Table des matières

I-	Présentation et contexte	6
1.1.	Présentation du projet agrivoltaïque de Saulvaux	6
1.2.	Contexte et scénario climatique à Saulvaux	9
II-	Objectifs du mémoire de synergies agricoles	10
III-	Matériels et méthodes	11
3.1.	Utilisation du logiciel Optisoleo	11
3.2.	Données d'entrée des modélisations agro-climatiques	11
3.2.1.	Données d'entrée météo	11
3.2.2.	Données d'entrée type de sol	11
3.2.3.	Données d'entrée de la structure photovoltaïque	13
3.3.	Indicateurs agro-climatiques	15
IV-	Stades de développement des cultures et élaboration de leur rendement	16
4.1.	Colza	17
4.2.	Blé tendre d'hiver et orge d'hiver : céréales à paille	19
4.3.	Luzerne	21
V-	Synergie des panneaux photovoltaïques avec la production agricole	23
5.1.	Colza	23
5.1.1.	Analyse des indicateurs agro-climatiques	23
5.1.2.	Synthèse des synergies agricoles pour le colza	28
5.2.	Blé et orge	29
5.2.1.	Analyse des indicateurs agro-climatiques	29
		31
5.2.2.	Synthèse des synergies agricoles pour le blé et l'orge	36
5.3.	Luzerne	39
5.3.1.	Analyse des indicateurs agro-climatiques	39
5.3.2.	Synthèse des synergies agricoles pour la luzerne	45
VI-	Synthèse des synergies agricoles rendus par le projet	45

Table des figures

Figure 1 : Répartition des productions végétales en surface de l'EARL de la Croix Castel (Source : données exploitation, mise en forme Agrosolutions)	6
Figure 2 : Rotation culturale avant le projet	6
Figure 3 : Rotation culturale pendant le projet	7
Figure 4 : plan de masse du projet de Saulvaux (source : Destren)	8
Figure 5 : Cartographie du potentiel agronomique des sols (source : Sol &co®)	12
Figure 6 : Photographies de la parcelle (Source : Agrosolutions)	12
Figure 7 : Vue en coupe des panneaux photovoltaïques (Source : Destren)	13
Figure 8 : plan de l'inter-rang de 14 m	13
Figure 9 : Localisation de la zone cultivée par rapport à la rotation des panneaux	14
Figure 10 : Localisation de la zone témoin et des deux systèmes agrivoltaïques	14
Figure 11 : Stades de développement du colza et élaboration de son rendement	17
Figure 12 : Stades de développement des céréales à paille et élaboration de son rendement	19
Figure 13 : Stades de développement de la Luzerne et élaboration de son rendement	21
Figure 14 : nombre de jours de stress thermique du colza par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo)	23
Figure 15 : ETP du colza en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo)	24
Figure 16 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps pour la zone témoin, la zone avec inter-rang de 14 m pour le colza (source : Optisoleo)	25
Figure 17 : Irradiance journalière en W / m ² pour le colza en zone témoin et en zone Agri PV (source : Optisoleo)	27
Figure 18 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Optisoleo).	27
Figure 19 : nombre de jours de stress thermique du blé par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo).	29
Figure 20 : nombre de jours de stress thermique de l'orge par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo).	29
Figure 21 : ETP du blé en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo).	30
Figure 22 : ETP de l'orge d'hiver en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo).	30
Figure 23 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps du blé tendre de la zone témoin et de la zone agri PV (Source : Optisoleo)	31
Figure 24 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps de l'orge d'hiver de la zone témoin et de la zone agri PV (Source : Optisoleo)	32
Figure 25 : Irradiance journalière en W / m ² pour le blé d'hiver en zone témoin et en zone Agri PV (Source : Optisoleo)	34
Figure 26 : Irradiance journalière en W / m ² pour l'orge d'hiver en zone témoin et en zone Agri PV (Source : Optisoleo)	34
Figure 27 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Agrisoleo).	35
Figure 28 : nombre de jours de stress thermique de la luzerne par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo)	39
Figure 29 : ETP de la luzerne en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo)	40
Figure 30 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps pour la zone témoin, la zone avec inter-rang de 14 m pour la luzerne (source : Optisoleo)	41
Figure 31 : Irradiance journalière en W / m ² pour la luzerne en zone témoin et en zone Agri PV (source : Optisoleo)	43

Figure 32 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Optisoleo). 43

Table des tableaux

Tableau 1 : Scénario climatique actuel et futur pour Saulvaux, source : Climatdiag-agriculture.fr	9
Tableau 2 : Nombre de jours de stress hydrique du colza par stade pour les trois systèmes (source : Optisoleo)	26
Tableau 3 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur le colza.....	28
Tableau 4 : Nombre de jours de stress hydrique du blé tendre et de l'orge d'hiver par stade pour les trois systèmes, source : Optisoleo	33
Tableau 5 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur le blé tendre et l'orge d'hiver.....	36
Tableau 6 : Impact de l'ombrage sur la culture du blé	37
Tableau 2 : Nombre de jours de stress hydrique de la luzerne par stade de développement	42
Tableau 3 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur la luzerne	45

I- Présentation et contexte

1.1. Présentation du projet agrivoltaïque de Saulvaux

Le projet développé par Destren Energy, est prévu sur une parcelle à vocation agricole, pour une emprise totale de 30,37 ha sur la commune de Saulvaux dans le département de la Meuse (55). Ces parcelles sont actuellement exploitées M. COLLIN, chef d'exploitation de l'EARL de la Croix Castel. Actuellement, la parcelle du projet est cultivée en grandes cultures. Le potentiel agronomique de cette parcelle est considéré comme faible par M. Collin, justifiant ainsi le choix de la localisation du projet parmi les différentes parcelles de l'exploitation.

L'EARL de la Croix Castel a une activité de polyculture-élevage, avec un atelier grandes cultures et un atelier bovins lait. M. Collin exploite ainsi 258,4 ha, dont 212,1 ha de grandes cultures et 46,3 ha de prairies.

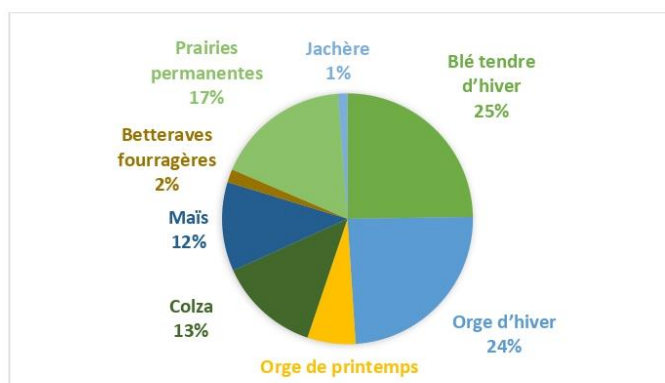


Figure 1 : Répartition des productions végétales en surface de l'EARL de la Croix Castel
(Source : données exploitation, mise en forme Agrosolutions)

L'exploitant agricole actuel continuera d'exploiter la parcelle agricole du projet en agrivoltaïsme. La parcelle sera conduite en agriculture conventionnelle et exploitée en grandes cultures, avec un changement de la rotation. Actuellement, la rotation est la suivante :



Figure 2 : Rotation culturale avant le projet

Les cultures de la rotation actuelle seront maintenues pendant le projet avec l'intégration supplémentaire de la culture de luzerne dans la rotation (production de foin pour le cheptel bovin) :

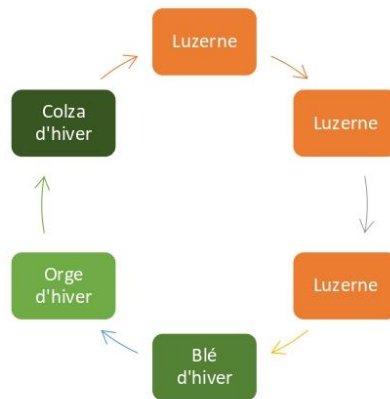


Figure 3 : Rotation culturale pendant le projet

Le matériel de l'agriculteur, les engins agricoles utilisés pour les travaux aux champs, le semis et la récolte, ont guidé l'écartement des rangées de trackers, un inter-rang de 14 mètres de pieu à pieu a donc été retenu. La largeur de travail et donc de production est de 12 m, amenant ainsi une bande enherbée de 1m de chaque côté des pieux (distance de sécurité entre engins agricoles et pieux). La culture mise en place annuellement ainsi que son mode de conduite et les bandes enherbées seront bien identiques quel que soit l'inter-rang, la parcelle formera une unité agricole.

Le plan de masse ci-dessous présente le plan d'implantation des rangées de panneaux. Certaines zones trop enclavées ou de trop forte pente ont été évitées. Par ailleurs, les panneaux trackers sont classiquement implantés selon un axe Nord-Sud, afin de respecter le sens de travail de l'agriculteur par rapport à la pente présente sur la parcelle, les rangées ont été légèrement décalées vers l'Ouest.

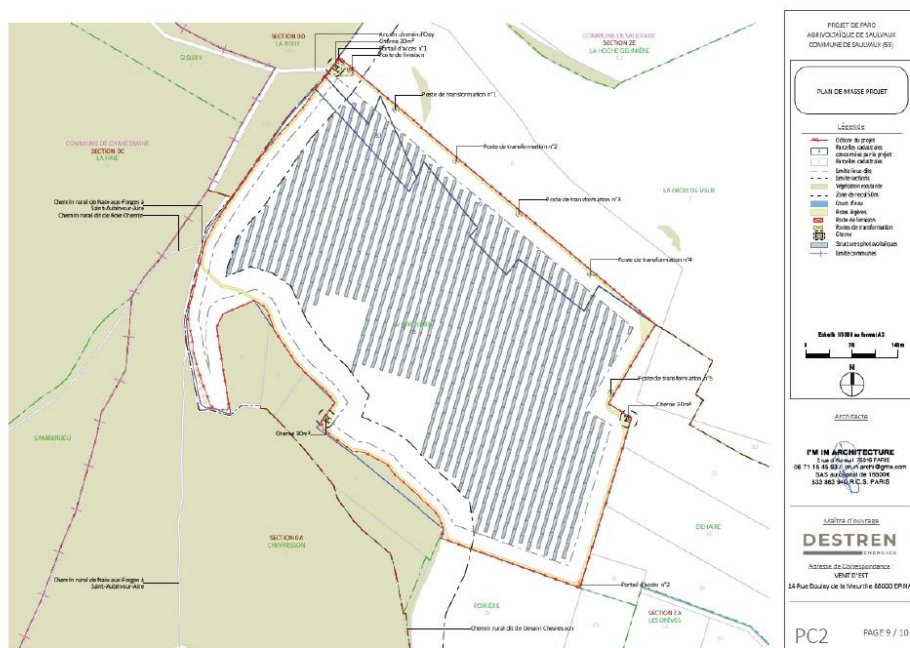


Figure 4 : plan de masse du projet de Saulvaux (source : Destren)

1.2. Contexte et scénario climatique à Saulvaux

L'outil Climadiag (<https://climadiag-agriculture.fr/>) a permis de déterminer le scénario climatique actuel et futur du secteur d'Saulvaux selon le réchauffement climatique actuel. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous selon différents indicateurs climatiques, avec un focus sur les périodes printemps et été comme il s'agit des périodes les plus problématiques pour les grandes cultures.

Tableau 1 : Scénario climatique actuel et futur pour Saulvaux, source : Climatdiag-agriculture.fr

	SCENARIO ACTUEL	SCENARIO FUTUR PROCHE 2030	SCENARIO FUTUR LOINTAIN 2050
TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE	13,57°C	$\Delta + 0,7^{\circ}\text{C}$	$\Delta + 1,4^{\circ}\text{C}$
NOMBRE DE JOURS $> 25^{\circ}\text{C}$	30 jours	$\Delta + 7 \text{ j}$	$\Delta + 18 \text{ j}$
CUMUL PLUVIOMETRIE ANNUELLE	1076 mm	$\Delta + 14 \text{ mm}$	$\Delta + 27 \text{ mm}$
CUMUL PLUVIOMETRIE PRINTEMPS (01/03 AU 31/05)	250 mm	$\Delta - 2 \text{ mm}$	$\Delta + 7 \text{ mm}$
CUMUL PLUVIOMETRIE ETE (01/06 AU 31/08)	231 mm	$\Delta - 7 \text{ mm}$	$\Delta - 15 \text{ mm}$
CUMUL EVAPOTRANSPIRATION ANNUELLE	665mm	$\Delta + 22 \text{ mm}$	$\Delta + 49 \text{ mm}$
BILAN HYDRIQUE ANNUEL	398 mm	400 mm $\Delta - 2 \text{ mm}$	385 mm $\Delta - 13 \text{ mm}$
BILAN HYDRIQUE ANNUEL PRINTEMPS (01/03 AU 31/05)	52 mm	41 mm $\Delta - 9 \text{ mm}$	48 mm $\Delta - 4 \text{ mm}$
BILAN HYDRIQUE ANNUEL ETE (01/06 AU 31/08)	- 83 mm	- 109 mm $\Delta - 26 \text{ mm}$	- 131 mm $\Delta - 48 \text{ mm}$

* Δ = variation par rapport au scénario actuel

A Saulvaux, la température moyenne va augmenter dans les années à venir. L'un des indicateurs les plus pertinents pour les grandes cultures dans le contexte de Saulvaux est le nombre de jour de stress thermique (avec une température $> 25^{\circ}\text{C}$) : il va fortement augmenter. Cela entraîne un risque d'échaudage plus important. Le cumul de pluviométrie annuelle va évoluer positivement, en revanche en été, période la plus critique au regard des grandes cultures d'hiver comme de printemps, le cumul de pluviométrie sera moins important. Cela se traduit également par le bilan hydrique en été qui sera d'autant plus déficitaire entraînant un stress hydrique encore plus important pour les cultures, cela sera associé au risque de stress thermique qui augmente. Enfin le cumul d'évapotranspiration annuelle va également augmenter, à cause de températures moyennes plus élevées, entraînant ainsi une consommation en eau plus importante et donc un besoin en eau plus important sur le cycle de la culture.

Ces deux scénarios, proche et lointain, viennent confirmer les besoins exprimés par l'agriculteur au regard de ses productions agricoles.

II- Objectifs du mémoire de synergies agricoles

Le changement climatique a un impact important sur l'agriculture, modifiant progressivement les conditions environnementales auxquelles les agriculteurs doivent s'adapter. Les variations de température (stress thermique) et les variations de précipitations (sécheresse, excès d'eau) influencent le cycle de croissance des cultures et la productivité de celles-ci, remettant en question les pratiques agricoles traditionnelles.

La loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'Accélération de la Production d'Energies Renouvelables (APER) a été publiée au Journal Officiel le 11 mars 2023. Ce texte facilite l'installation d'énergies renouvelables pour permettre de rattraper le retard pris dans ce domaine. Le titre III de la loi vise notamment à accélérer le déploiement du photovoltaïque, afin d'atteindre l'objectif de multiplier par 10 la capacité de production d'énergie solaire, pour dépasser les 100 GW installés à l'horizon 2050.

Dans les leviers de déploiement du photovoltaïque est mentionné l'agrivoltaïsme qui est défini à l'article 11 de la loi comme « installation de production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil et dont les modules sont situés sur une parcelle agricole où ils contribuent durablement à l'installation, au maintien ou au développement d'une production agricole ».

L'agrivoltaïsme constitue une solution innovante qui permet d'atténuer les effets du changement climatique sur l'agriculture, elle permet la production d'énergie renouvelable tout en maintenant une activité agricole.

- ✓ L'installation doit concerner un agriculteur actif ou une exploitation agricole à vocation pédagogique
- ✓ La production agricole doit être l'activité principale de la surface du projet et être significative
- ✓ Il faut que le revenu soit durable pour l'exploitation agricole
- ✓ La technologie photovoltaïque fournit au moins l'un des services mentionnés aux 1° à 4° du II de l'article L. 314-36 du code de l'énergie, conformément aux conditions des articles R. 314-110 à R. 314-113 du même code. En outre, il doit être prouvé que le projet ne porte pas une atteinte substantielle à l'un de ces services ou une atteinte limitée à deux de ces services. Les services considérés sont les suivants :

1. L'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques ;
2. L'adaptation au changement climatique ;
3. La protection contre les aléas ;
4. L'amélioration du bien-être animal.

Ce mémoire de synergies a pour objectif de démontrer ce dernier point. Il répond à la note technique justifiant des services apportés par l'installation et de la non atteinte substantielle à l'un de ses services, note à intégrer au dossier des notes justificatives, justifiant du caractère agrivoltaïque ou non du projet.

Dans le cadre du projet agrivoltaïque d'Saulvaux, l'objectif de ce mémoire de synergies agricoles est ainsi d'étudier quel(s) service(s) apporte(nt) les trackers aux grandes cultures de la rotation.

Il permettra de comparer le système agrivoltaïque mis en place (zone de culture sous panneaux + zone de culture entre panneaux) à une zone témoin sans panneaux vis-à-vis du développement des cultures au travers d'indicateurs agro-climatiques. Il permettra également de comparer les deux systèmes agrivoltaïques selon l'inter-rang de 25,6 m et celui de 13,6 m afin d'étudier leur impact sur les productions végétales. Un des inter-rangs apporte-t-il davantage de bénéfices aux grandes cultures que l'autre ? Ou au contraire l'un est-il plus néfaste ? Cela permettra de déterminer si un des inter-rangs est plus adapté dans le contexte pédoclimatique du projet.

III- Matériels et méthodes

3.1. Utilisation du logiciel Optisoleo

Ce mémoire de synergies agricoles est réalisé grâce au logiciel Optisoleo d'Agrisoleo. La société, experte dans l'accompagnement des projets de la filière agrivoltaïque, a développé le logiciel de simulation OptiSoleo pour optimiser les choix techniques de prédimensionnement afin de maximiser les bénéfices agronomiques des projets et d'optimiser la synergie de la production agricole et de la production solaire.

Optisoleo est le premier logiciel fondé sur la modélisation du microclimat sous les panneaux et l'analyse agronomique pour optimiser et auditer les installations agrivoltaïques. Il utilise la modélisation microclimatique et agronomique afin de :

- ✓ Simuler et évaluer le microclimat induit par les ombrières agrivoltaïques pour tout type de structures (fixes, trackers, trackers piloté),
- ✓ Simuler les impacts agronomiques pour tout type de cultures,
- ✓ Simuler les rendements de productible électrique, en fonction du pilotage des panneaux.

Il permet ainsi d'établir un diagnostic justifié en matière d'utilité agricole, et d'optimiser la synergie installation/culture. La fiabilité reconnue de ses modélisations l'habilité à produire également une évaluation fiable et indépendante de la qualité du projet, nécessaire au dépôt du dossier de demande permis de construire.

Les résultats sortis d'Optisoleo seront analysés et interprétés en termes de services apportés vis-à-vis de la loi APER selon les 4 services mentionnées dans le paragraphe II.

3.2. Données d'entrée des modélisations agro-climatiques

Les modélisations réalisées via le logiciel Optisoleo sont réellement représentatives du microclimat créé par la structure agrivoltaïque du projet d'Saulvaux et du contexte pédoclimatique des parcelles agricoles. En effet, les paramètres ont été adaptés au plan de masse et aux données des trackers installés correspondant au dimensionnement du projet ainsi qu'à la météo et au type de sol.

3.2.1. Données d'entrée météorologiques

Les **données météo** utilisées dans le logiciel sont une moyenne pluriannuelle (2001-2020) issues de stations météorologiques et d'imagerie en fonction de la localisation GPS de la parcelle (triangulation).

3.2.2. Données d'entrée type de sol

Les données utilisées dans le cadre de la modélisation Optisoleo proviennent de l'étude pédologique du site du projet réalisée par le laboratoire Sol & Co. La simulation du projet de Saulvaux se base donc sur un paramètre de réserve utile (RU) estimée à 20mm. Cette donnée correspond à 85% des points de sondages de l'étude pédologique.

Les résultats pédologiques mettent en exergue des sols peu profonds constitués d'un ou deux horizons distincts. Plusieurs sondages ne mettent en avant qu'un seul horizon du fait d'un refus de tarière causé par les teneurs en argiles très élevées. On note par ailleurs la présence importante en surface de cailloux et de pierres.

De manière générale, la texture est peu équilibrée le long du profil de sol (horizons H1 et H2) du fait des teneurs très élevées en argiles, impliquant une mauvaise stabilité structurale. Cependant, les argiles sont naturellement « riches » en éléments nutritifs et présentent de bonnes propriétés de rétention en eau.

Néanmoins, la forte teneur en argiles affecte négativement le potentiel pédologique des sols, les rendant difficiles à travailler, compacts et de faible porosité, ce qui limite les échanges gazeux et la circulation des nutriments via la solution du sol.

En plus de ces horizons argileux et compacts, une abondance d'éléments grossiers (particules dont la taille est supérieure à 2 mm) en surface est observée. Ces éléments sont calcaires et principalement de grande taille, pouvant atteindre une taille d'une vingtaine de centimètres.

Le potentiel pédologique évalué est « faible ». En effet, les sols sont peu profonds, possèdent une texture peu équilibrée et trop argileuse. De plus, la structure du sol est relativement compacte.

Concernant la fertilité agronomique, les paramètres chimiques sont sensiblement homogènes sur l'ensemble du site et indiquent des sols de pH basiques (pH supérieur à 8). Ces valeurs sont élevées (pH compris entre 8,0 et 8,5), ce qui implique une biodisponibilité limitée des éléments nutritifs pour la majorité des essences végétales.

La carte présentée en Figure 5 présente le potentiel agronomique en compilant les résultats du potentiel pédologique (physique) et de la fertilité agronomique (chimique).

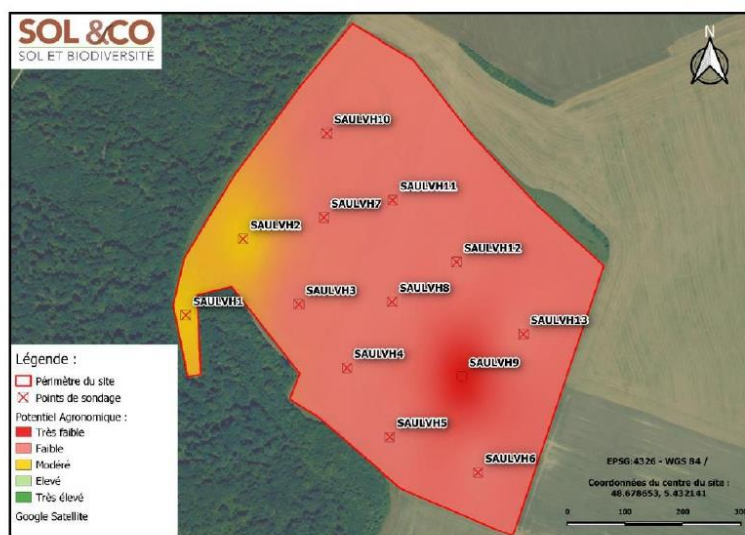


Figure 5 : Cartographie du potentiel agronomique des sols (source : Sol &co®)



Figure 6 : Photographies de la parcelle (Source : Agrosolutions)

3.2.3. Données d'entrée de la structure photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques mis en place seront des trackers dont le plan de coupe est présenté ci-après. En position horizontale, la hauteur du panneau, à son point le plus bas, est de 2,7 mètres lorsque le panneau est en position horizontale, le point le plus bas du panneau est de 1,10 mètres lorsque le panneau est à son angle maximal de rotation. La largeur d'une table est de 4,49 mètres.

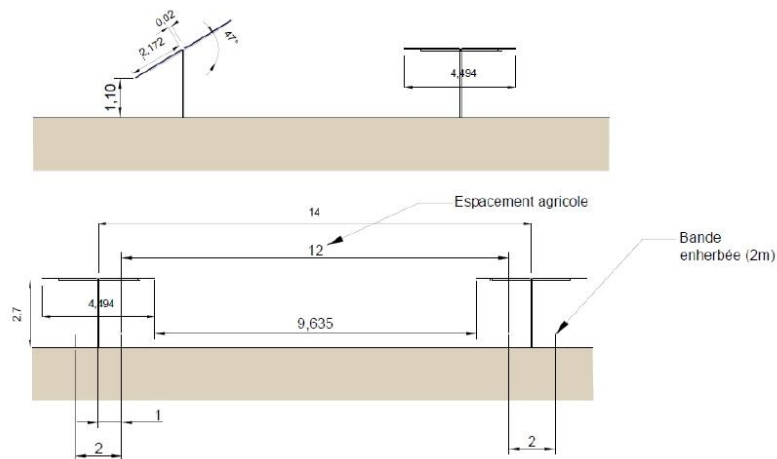


Figure 7 : Vue en coupe des panneaux photovoltaïques (Source : Destren)

Les deux schémas ci-dessous précisent les largeurs de bandes cultivées (cultures), de travail et de bandes enherbées au pied des trackers selon la largeur de l'inter-rang, qui a été défini selon le matériel agricole de l'agriculteur. La largeur de la bande enherbée au pied des trackers est de 1 m, largeur permettant aux engins agricoles d'être utilisés sans risque vis-à-vis des panneaux.

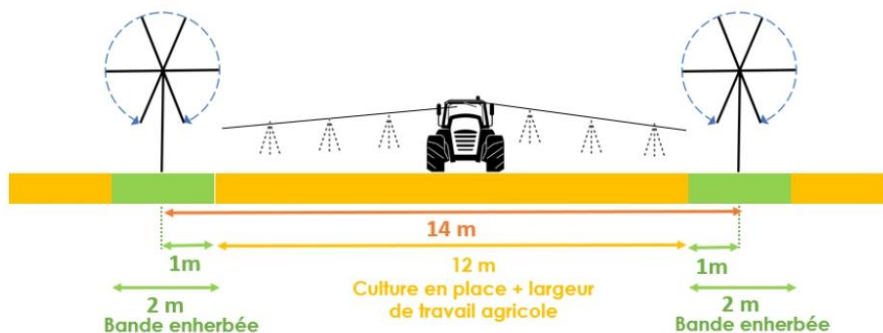


Figure 8 : plan de l'inter-rang de 14 m

Ainsi, selon la largeur de 1m de la bande enherbée au pied des rangées de panneaux et la largeur de 4,49 m d'une table, lorsque les tables seront en position horizontale, 1,25 m de la culture sera présente directement sous le panneau comme le montre le schéma ci-dessous.

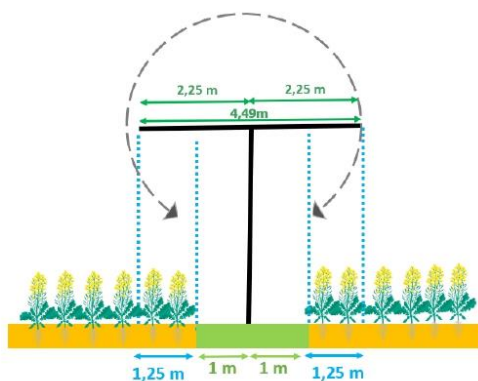


Figure 9 : Localisation de la zone cultivée par rapport à la rotation des panneaux

De plus, une zone témoin attenante à la surface d'implantation des trackers est prévue afin de permettre une comparaison et une référence sans panneaux. Le schéma ci-dessous représente la localisation de la zone témoin :



Figure 10 : Localisation de la zone témoin et des deux systèmes agrivoltaïques

Pour les 4 cultures de la rotation du projet, luzerne, blé tendre hiver, orge printemps et colza les deux zones seront à chaque fois comparées et analysées :

- ✓ Zone témoin
- ✓ Système agrivoltaïque inter-rang de 14 m

3.3. Indicateurs agro-climatiques

Différents indicateurs agro-climatiques vont être analysés pour chacune des cultures de la rotation du projet et pour les trois zones étudiées : ils sont détaillés ci-dessous. Ils permettent de qualifier l'impact potentiel d'un quelconque stress climatique au cours du cycle de développement de la culture. En effet, au cours du cycle de développement d'une culture (du semis jusqu'à sa récolte), plusieurs événements climatiques majeurs sont susceptibles d'affecter son rendement. Certains des indicateurs climatiques sont clés dans la croissance de la plante. C'est le cas de trois paramètres en particulier, suivis annuellement : le rayonnement, la température (basse comme haute), la quantité d'eau (déficit pluviométrie – évapotranspiration ou excès).

Ces indicateurs ont été définis au regard des productions agricoles du projet, de leur conduite et des problématiques et besoins de l'agriculteur.

Les données relatives à l'eau sont exprimées en mm d'eau = millimètre d'eau = 10 m3/ha.

Stress thermique (chaleur)

Il s'agit du nombre de jours pour lesquels la température est supérieure à 25°C et qui entraîne un stress plus ou moins important selon la plante et son stade de développement.

Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ETP) est la quantification des pertes en eau du système plante + sol : c'est la combinaison des pertes en eau dues à la transpiration des feuilles de la plante et à l'évaporation du sol. L'évapotranspiration d'une culture détermine son besoin en eau et son niveau de stress hydrique associé à d'autres paramètres comme le stress thermique.

Consommation en eau

La consommation en eau traduit la consommation en eau de la plante en mm tout au long de son cycle de culture : quantité qui va varier selon la culture en elle-même, son stade de développement et les conditions climatiques. Elle traduit en partie l'ETP.

Réserve en eau

Concernant la réserve en eau des sols, il est nécessaire d'analyser la RFU, Réserve Facilement Utilisable. Il s'agit de la réserve en eau du sol facilement mobilisable et utilisable par la plante. Si la plante peut mobiliser l'eau de la RFU, elle n'est pas en stress hydrique et toutes ses fonctions sont assurées. En revanche, la plante est en stress hydrique quand elle doit aller puiser dans la RS, Réserve de Survie, et entre alors en flétrissement : l'eau des horizons plus profonds étant moins facile d'accès compte tenu de la plus faible densité racinaire de la plante. La profondeur de la RFU et de la RS dépend du type de sol et du système racinaire de chaque culture.

Stress hydrique

Le stress hydrique traduit un apport d'eau déficitaire par rapport aux besoins de la plante, les quantités d'eau disponibles du sol sont trop faibles au regard de ses besoins. Il est à mettre en lien avec l'ETP, la consommation en eau de la plante, la réserve en eau du sol et peut traduire un besoin d'irrigation.

Irradiance

L'irradiance est la quantité d'énergie solaire arrivant chaque seconde sur une surface de 1 m². Elle est déterminante pour l'apport de rayons lumineux nécessaires notamment à la photosynthèse des plantes et leur permettant d'assurer leurs fonctions vitales.

IV- Stades de développement des cultures et élaboration de leur rendement

Ce paragraphe présente les stades de développement des cultures de la rotation du projet, associés aux différentes composantes qui participent à l'élaboration de leur potentiel maximal de rendement. L'étude des risques climatiques d'une culture nécessite dans un premier temps de comprendre quels paramètres climatiques sont déterminants pour sa production et quelle période de sensibilité elle présente. A chaque culture correspond des périodes de sensibilité au cours desquelles un stress climatique peut induire un impact sur le rendement final. Ainsi, la connaissance de la physiologie des cultures et des stress climatiques associés sont déterminants pour l'analyse des indicateurs agro-climatiques retenus ci-dessus.

4.1. Colza

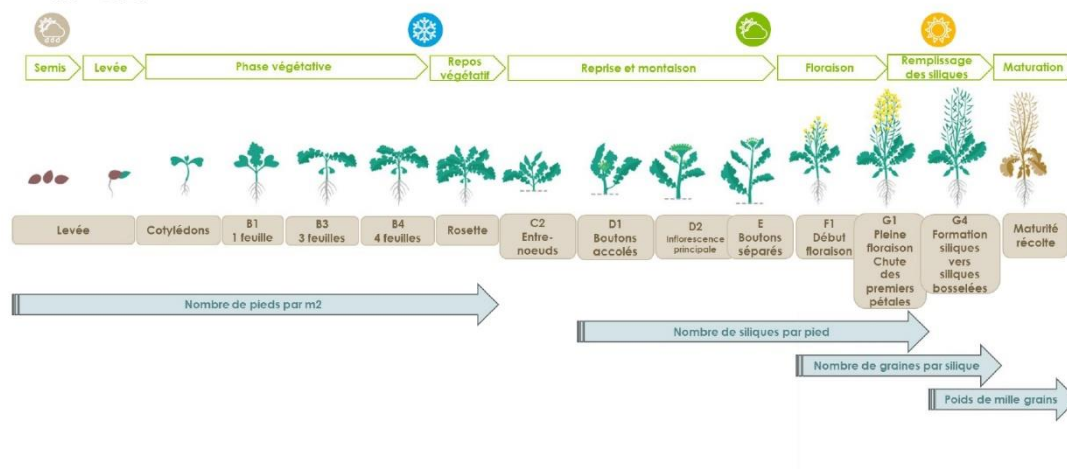


Figure 11 : Stades de développement du colza et élaboration de son rendement

Impact du nombre de pieds / m²

- ✓ Un déficit hydrique ou à l'inverse un excès d'eau nuit à l'implantation du colza.
- ✓ Des températures élevées à l'automne favorisent l'élongation pré-hivernale.
- ✓ Des périodes répétées d'alternance de gel/dégel provoquent des dégâts sur la culture.
- ✓ La saturation en eau des sols en hiver et à la reprise de la végétation nuit à la densité de pieds du colza.

Impact du nombre de siliques / pied et du nombre de graines / silique

- ✓ Des épisodes de gel tardif (dans la durée ou répétés) lors de la montaison vers la floraison nuit au développement du colza (port tombant, perte de biomasse, perte de pieds, impact sur les inflorescences, avortement fleurs).
- ✓ Un rayonnement important lors de la montaison (pour la photosynthèse) permet de produire de la biomasse (feuilles) et de stocker dans les racines (réserves) afin de préparer la floraison.
- ✓ Des températures « fraîches » permettent de transformer un maximum de fleurs en siliques, et couplées à un fort rayonnement, limite les avortements et le nombre de graines/silique est optimal : le rapport rayonnement sur température doit être élevé, soit beaucoup de rayonnement avec des températures plutôt fraîches à la floraison et formation des siliques.

Impact du PMG

- ✓ Un rayonnement important lors de la formation des siliques limite les avortements et permet une meilleure fructification : favorise la photosynthèse et le transfert des réserves vers les graines.
- ✓ Un temps « frais » associé à quelques précipitations (eau devant être disponible pour la culture) lors de la phase de remplissage des graines permet d'obtenir des rendements plus élevés.

En synthèse, les principaux facteurs préjudiciables pour le colza sont :

- ✓ Un stress hydrique lors de l'implantation
- ✓ Des gelées tardives lors de la montaison (formation des inflorescences)
- ✓ Un faible rayonnement voire une absence de rayonnement lors de la floraison, formation des siliques et remplissage des graines.
- ✓ Un stress thermique, soit des températures élevées > à 25°C, lors des phases de floraison et de formation des siliques (avortement fleurs + siliques) et remplissage des graines (échaudage : arrêt du remplissage)
- ✓ Un stress hydrique lors des phases de floraison et formation des siliques (avortement fleurs + siliques) et remplissage des graines (diminution du poids)

4.2. Blé tendre d'hiver et orge d'hiver : céréales à paille

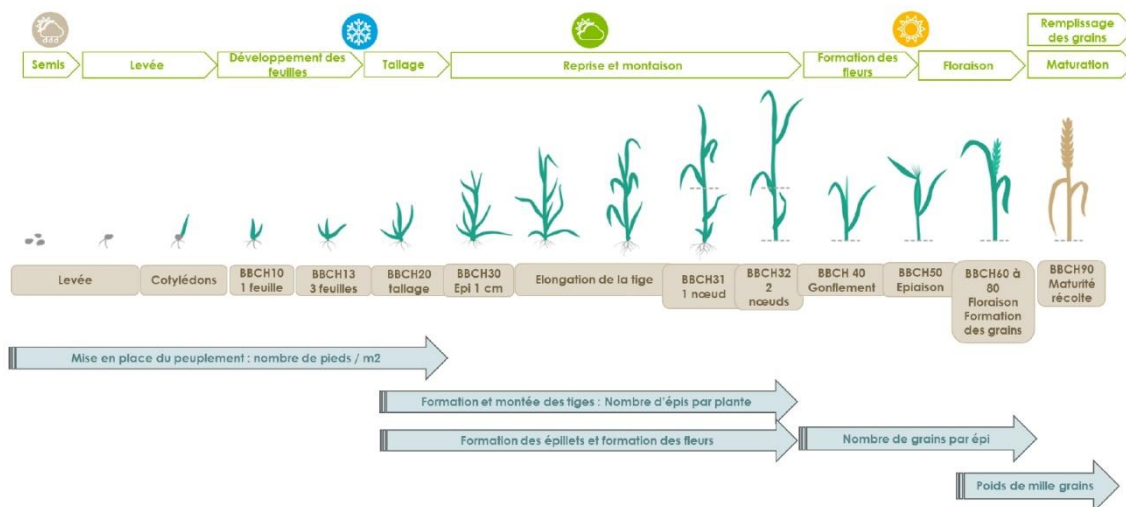


Figure 12 : Stades de développement des céréales à paille et élaboration de son rendement

Impact du nombre de pieds / m²

- ✓ Les pertes hivernales sont le plus souvent liées à des excès d'eau et/ou au froid prolongé selon le stade de la plante (gel) : un cumul d'épisodes de gel peut entraîner un dépérissement progressif et/ou des pertes de pieds.
- ✓ A ce stade, peu d'autres facteurs impactent cette composante de rendement.

Impact du nombre d'épis / plante

Le nombre d'épis du blé par mètre carré dépend de la densité initiale et de la capacité de tallage.

- ✓ Il est nécessaire que la montaison soit longue pour optimiser le nombre d'épis / plante.
- ✓ Des températures négatives (gel) à partir généralement du stade épi 1 cm stresse la céréale et dégrade son développement. Tout stress perturbe la montée des épis et provoque des régressions de talles. L'épi en formation est un organe sensible au gel : destruction partielle ou totale des épis. Le gel peut provoquer des brûlures sur les feuilles.

Impact du nombre de grains / épis

- ✓ Une sécheresse, entraînant un déficit hydrique, à partir de la fin montaison pénalise fortement le potentiel de rendement. La sécheresse est assez préjudiciable à la culture si elle intervient pendant la seconde partie de la montaison, du stade 2 nœuds à floraison affectant le peuplement et la fertilité des épis.
- ✓ Des défauts de rayonnement peuvent fortement affectés le nombre de grains / épis.

Impact du PMG

- ✓ Des températures élevées (supérieures à 25°C) sont un facteur de risque pour une céréale à paille causant un échaudage de fin de cycle, qui est accentué par un manque d'eau pendant la phase de remplissage du grain (surtout avant « grain laiteux »). Cela provoque un défaut de croissance des grains impactant ainsi le PMG.
- ✓ Lors de la formation et remplissage des grains, les besoins en eau de la plante sont les plus élevées à cette période, car l'évapotranspiration augmente couplée à des températures plus chaudes. Or en parallèle, les réserves en eau du sol s'amointrissent et provoquent un stress hydrique par manque de précipitation. Ainsi, la sécheresse est d'autant plus préjudiciable à la culture à cette période et impacte le PMG.
- ✓ Un manque de rayonnement (fin mai- début juin) est très défavorable, et limite dès le départ la taille des enveloppes des grains et impacte le PMG.

En synthèse, les principaux facteurs préjudiciables pour les céréales à paille sont :

- ✓ Un excès d'eau en hiver
- ✓ Du gel prolongé, important et tardif lors de la reprise de végétation, sur les épis principalement
- ✓ Un stress hydrique du stade 2 nœuds au remplissage des grains
- ✓ Un stress thermique, soit des températures élevées > à 25°C, lors du remplissage des grains et de la maturation (échaudage = arrêt du remplissage)
- ✓ De faibles rayonnements lors la montaison (montée à épis) et de la floraison au remplissage

4.3. Luzerne

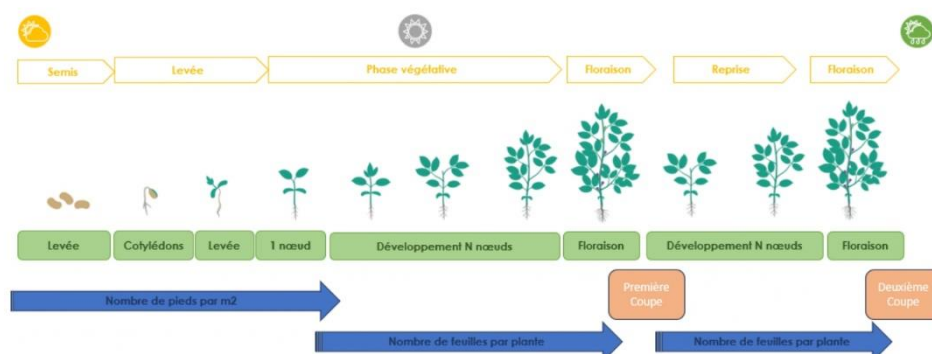


Figure 13 : Stades de développement de la Luzerne et élaboration de son rendement

Impact du nombre de pieds / m²

- ✓ Au stade de développement initial la luzerne peut souffrir d'un excès de pluviométrie dans le cas d'une implantation sur un sol hydromorphe ou trop compacte.
- ✓ Une sécheresse au moment du semis peut nuire au bon développement de la luzerne et à son implantation initiale

Impact sur la biomasse de la plante

- ✓ Un déficit hydrique élevé entre une coupe et une floraison peut nuire à la croissance de la luzerne et donc impacter le rendement. En effet, un épisode de sécheresse important peut provoquer un flétrissement précoce des feuilles, une limitation de la floraison.
- ✓ Une pluviométrie trop abondante en fin de cycle peut favoriser l'émergence d'adventices qui peuvent entrer en compétition avec la Luzerne.
- ✓ Un excès d'eau en fin de cycle peut provoquer des phénomènes de verse.

En synthèse, les principaux facteurs préjudiciables pour la luzerne sont :

- ✓ Des précipitations trop abondantes dans le cas d'une implantation sur des parcelles hydromorphes.
- ✓ Un manque d'eau au moment du semis.
- ✓ Un stress hydrique entre une première coupe et une deuxième floraison avec de forts impacts sur le rendement.
- ✓ Un excès d'eau en fin de cycle pouvant favoriser des phénomènes de verse et la pousse d'adventices.

V- Synergie des panneaux photovoltaïques avec la production agricole

5.1. Colza

5.1.1. Analyse des indicateurs agro-climatiques

Stress thermique



Ci-dessous, est présenté le nombre de jour de stress thermique ($T > 25^{\circ}\text{C}$) par stade de développement du colza de la zone témoin et du système agrivoltaïque avec inter-rang de 14 mètres.

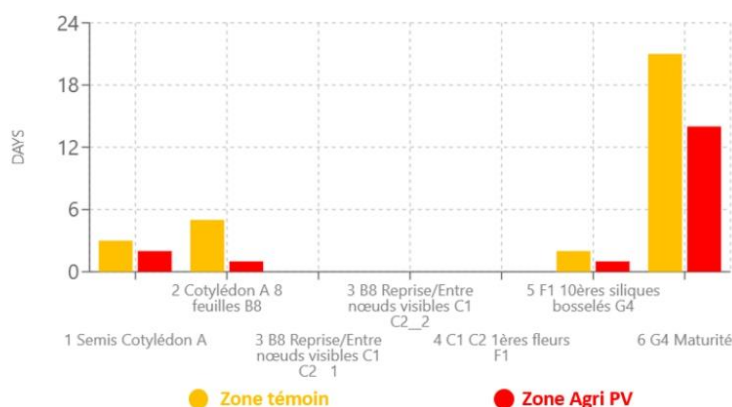


Figure 14 : nombre de jours de stress thermique du colza par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo)

Le système agriphotovoltaïque permet une diminution du nombre de jours de stress thermique par rapport au témoin, et ce quel que soit le stade du colza. La zone agri PV a un jour de stress thermique en moins par rapport à la zone témoin au stade « semis cotylédon ». Le nombre de jours de stress thermique est divisé par 5 au stade « Cotylédon A - 8 feuilles B8 » et il est divisé par deux au stade « F1 - 10ères siliques bosselés G4 ». Enfin, le nombre jours en stress thermique diminue de 33% en zone agriPV par rapport à la zone témoin en stade « maturité ».

Au moment du semis et au stade « Cotylédon A - 8 feuilles B8 », le stress thermique n'est pas le facteur le plus limitant. En revanche, le stress thermique est préjudiciable lors de la phase de « F1 - 10ères siliques bosselés G4 » (formation des graines dans les siliques) impactant le nombre de graines / silique et de maturation (remplissage des graines) impactant le PMG.

Avec une diminution du nombre de jours de stress thermique à ces 2 stades, le système agrivoltaïque, est bénéfique au colza.

Évapotranspiration (ETP)



Le graphique ci-dessous combine les résultats de l'ETP de la zone témoin, du système agrivoltaïque. Ils sont présentés pour les différents stades de développement du colza, reprenant par stade l'ETP de la zone témoin et celle du système agrivoltaïque.

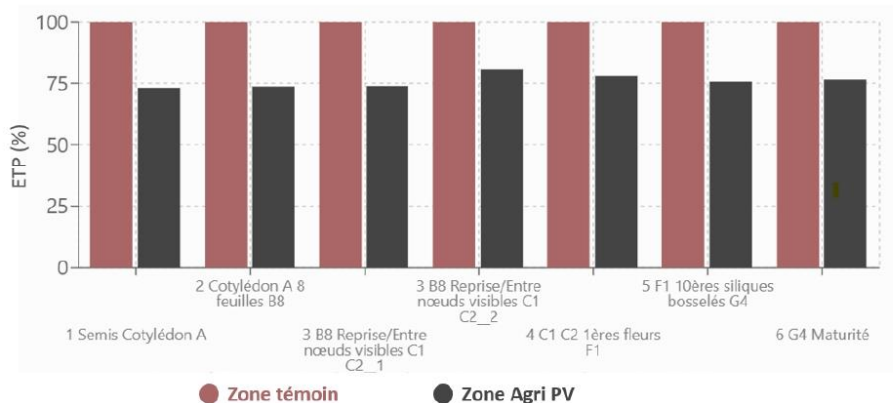


Figure 15 : ETP du colza en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo)

Le système agriphotovoltaïque permet une ETP inférieure à celle de la zone témoin à chaque stade de développement du colza, d'au minimum 20%.

En effet, l'ETP moyen annuel est de 76 % pour le système agriphotovoltaïque.

Une diminution de l'ETP à chaque stade de développement du colza va limiter le stress hydrique du colza, les pertes en eau seront moins importantes et il y aura donc davantage d'eau disponible pour la parcelle.

Réserve en eau



Le graphique ci-dessous représente la réserve en eau du sol exprimé en % sur une base 100 % (réserve d'eau maximale permise dans le contexte pédoclimatique du projet) de la zone témoin, du système agrivoltaïque avec inter-rang de 13,6m et de celui avec inter-rang de 25,6m. La réserve en eau du sol est exprimée de l'implantation du colza à sa récolte (soit du 15 août année N au 15 juillet année N+1).

Le stress hydrique correspond au moment où la plante doit puiser dans la réserve de survie (RS dans le graphique ci-dessous, seuil de 50% de la RU symbolisé par la ligne en pointillés orange). Cette situation qui compte de nombreux jours de stress hydrique s'explique par la très faible profondeur de la réserve utile (20mm), celle-ci se vide rapidement. Toutefois, elle peut se remplir aussi rapidement, c'est d'ailleurs ce que l'on peut observer sur le graphique avec les quelques pics occasionnels.

Le colza de la zone témoin est bien confronté à un stress hydrique à partir de son implantation sur la parcelle et cela jusqu'à fin octobre. La culture subit de nouveau le phénomène de stress hydrique à partir de la mi-février et ce jusqu'à la récolte à la mi-juillet. Cela est très impactant pour la maturation, avec le remplissage des graines et l'élaboration du PMG.

La parcelle est très sensible aux aléas sécheresses.

On remarque grâce à ce graphique que la réserve utile se vide moins rapidement en zone agriPV qu'en zone témoin, permettant ainsi d'alimenter le colza en eau plus longtemps

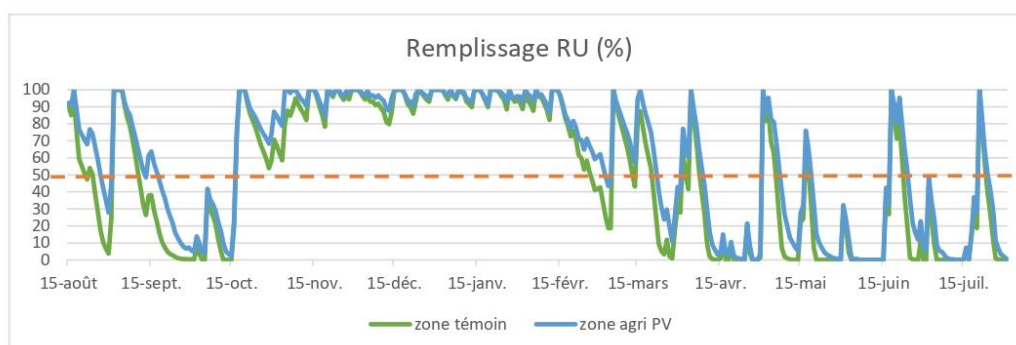


Figure 16 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps pour la zone témoin, la zone avec inter-rang de 14 m pour le colza (source : Optisoleo)

Stress hydrique


Le tableau ci-dessous reprend le nombre de jours de stress hydrique du colza par stade de développement pour les deux systèmes agrivoltaiques par rapport au témoin.

Légende du tableau ci-dessous :

- Effet très positif sur le colza
- Effet positif pour le colza
- Effet neutre pour le colza
- Effet légèrement négatif pour le colza
- Effet négatif pour le colza

Tableau 2 : Nombre de jours de stress hydrique du colza par stade pour les trois systèmes (source : Optisoleo)

	Zone témoin	Système agrivoltaique
Semis - Cotylédon A	2 jours	2 jours
Cotylédon – 8 feuilles B8	38 jours	30 jours (-8 j)
B8 - Reprise/Entre nœuds visibles C1- C2_1	14 jours	14 jours
B8 - Reprise/Entre nœuds visibles C1- C2_2	0 jours	0 jours
C1-C2 - 1ères fleurs F1	29 jours	14 jours (-15 j)
F1 - 10ères siliques bosselés G4	44 jours	44 jours
Maturation	69 jours	68 jours

La présence de panneau en limitant l'ETP permet de réduire le stress hydrique subi par le colza lors de la première phase de développement de la culture (phase Cotylédon – 8 feuilles B8), favorisant ainsi son implantation, et lors de la phase floraison (C1-C2 - 1ères fleurs F1). Lors du remplissage des grains (F1 - 10ères siliques bosselés G4), une des phases les plus critiques du colza face au stress hydrique, le système agrivoltaique n'a pas d'influence sur le phénomène de stress hydrique. L'occurrence du stress hydrique est quasi identique pour la phase de maturation des grains.

La présence de panneau permet donc de limiter fortement le stress hydrique à deux stades clés pour le colza.

Irradiance



Le graphique ci-dessous présente d'irradiance journalières en W / m^2 entre la zone témoin et la zone d'installation. Les résultats sont présentés de l'implantation du colza à sa récolte.

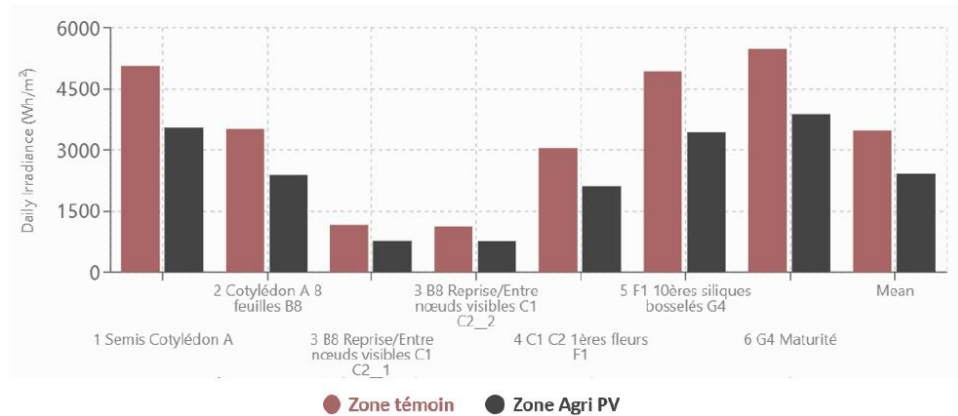


Figure 17 : Irradiance journalière en W / m^2 pour le colza en zone témoin et en zone Agri PV (source : Optisoleo)

Tout au long du cycle du colza, comme ce qui est attendu l'installation agrivoltaïque apportant de l'ombre, il y a une perte d'irradiance. En moyenne, la perte d'irradiance journalière est de 30%.

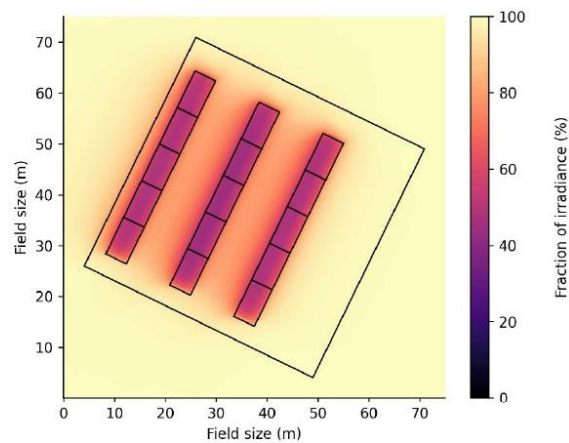


Figure 18 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Optisoleo).

Pour le colza, les rayonnements lumineux sont les plus importants à partir de la floraison. Or, cette perte d'irradiance peut impacter le colza et potentiellement son rendement.

Il est toutefois important de noter que cette perte d'irradiance permet de limiter l'évapotranspiration et le stress hydrique et thermique. La rotation des panneaux pourra être spécifiquement adaptée lors de la phase de floraison afin de maximiser le potentiel de rendement du colza

5.1.2. Synthèse des synergies agricoles pour le colza

Légende du tableau ci-dessous qui synthétise les impacts des trackers sur le colza et son développement :

	Effet très positif sur le colza
	Effet positif pour le colza
	Effet neutre pour le colza
	Effet légèrement négatif pour le colza
	Effet négatif pour le colza

Tableau 3 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur le colza

	Système agrivoltaïque
Stress thermique	Diminution du nombre de jours de stress thermique, surtout en fin de cycle qui devrait favoriser le remplissage des grains
ETP	Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Irradiance	La diminution d'irradiance permet de limiter le stress thermique et d'améliorer la résilience aux sécheresses mais peut potentiellement avoir un effet négatif lors de certaines phases notamment la floraison. La rotation des panneaux pourra être adaptée lors de ce stade en fonction des premiers résultats obtenus.

La modélisation a été effectuée en « full tracking solaire », si le rendement est impacté, alors une optimisation sur le pilotage des panneaux devra être faite. Sur le colza, il faudra à priori optimiser l'irradiance sur la culture lors de la floraison sur 2 à 3 semaines.

Il est important de noter qu'il n'existe actuellement aucune étude avec des résultats de rendements publiés sur du colza menée en agrivoltaïsme. Une seule étude en France a été menée sur du colza (Brunel-Muguet, S., 2013) avec une réduction d'irradiance de 43% de la floraison à la maturation en serre. L'ombrage a induit un développement plus important des feuilles sur la tige principale et les ramifications pour optimiser la captation de la lumière. Le rendement n'a pas été mesuré, mais la biomasse des siliques était identique entre le témoin et la modalité avec ombrage en fin de cycle. Toutefois, l'expérimentation n'ayant pas été menée au champ, les résultats ne sont pas généralisables. Les premiers projets mis en place

permettront d'améliorer les connaissances sur l'impact de l'ombrage sur le colza et d'adapter la rotation des panneaux en fonction des besoins de la culture.

5.2. Blé et orge

5.2.1. Analyse des indicateurs agro-climatiques

Stress thermique

Ci-dessous, est présenté le nombre de jour de stress thermique ($T > 25^{\circ}\text{C}$) par stade de développement du blé et de l'orge de la zone témoin et du système agrivoltaïque avec inter-rang de 14 mètres.

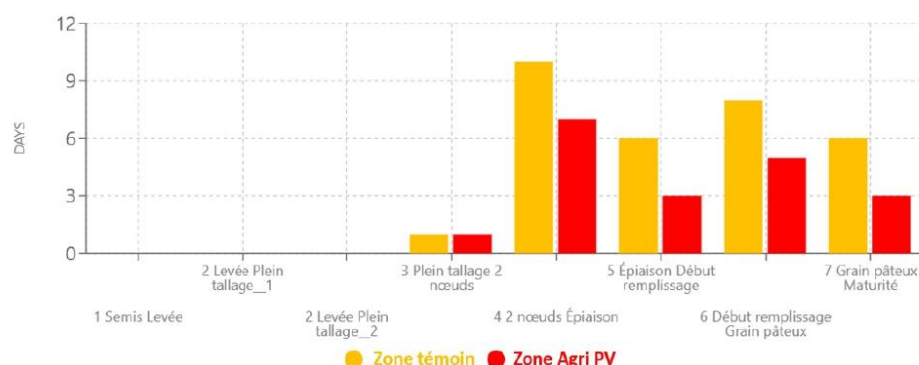


Figure 19 : nombre de jours de stress thermique du **blé** par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo).

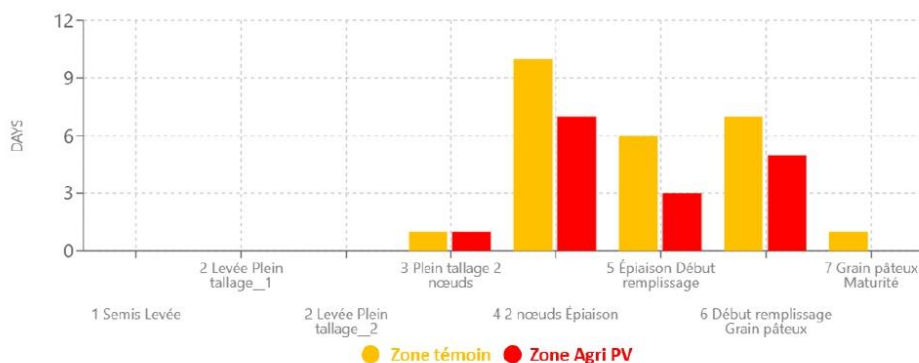


Figure 20 : nombre de jours de stress thermique de l'**orge** par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo).

Que ce soit pour le blé ou l'orge d'hiver, l'installation agrivoltaïque permet une diminution du nombre de jours de stress thermique par rapport au témoin. L'occurrence de jours en situation

de stress thermique est notamment réduite de plus de la moitié au stade 5 « épiaison début de remplissage », or c'est à ce stade que le stress thermique peut être un facteur limitant du rendement pour les céréales à paille avec un fort risque d'échaudage

Pour le stade numéro 6 « Début remplissage – Grain pâteux » ; le nombre de jours de stress thermique diminue de 29% pour l'orge et de 37% pour le blé.

Pour le stade 7 correspondant à la maturation de la céréale, le nombre de jours de stress thermique diminue de moitié pour le blé tandis que le risque disparaît complètement pour l'orge.

Avec une diminution du jours de stress thermique pendant les différents stades de développement, l'installation agrivoltaïque est bénéfique au développement du blé tendre d'hiver et de l'orge d'hiver.

Evapotranspiration (ETP)



Les graphiques ci-dessous combinent les résultats de l'ETP de la zone témoin, du système agrivoltaïque. Ils sont présentés pour les différents stades de développement du blé tendre et de l'orge d'hiver, reprenant par stade l'ETP de la zone témoin et celle du système agrivoltaïque.

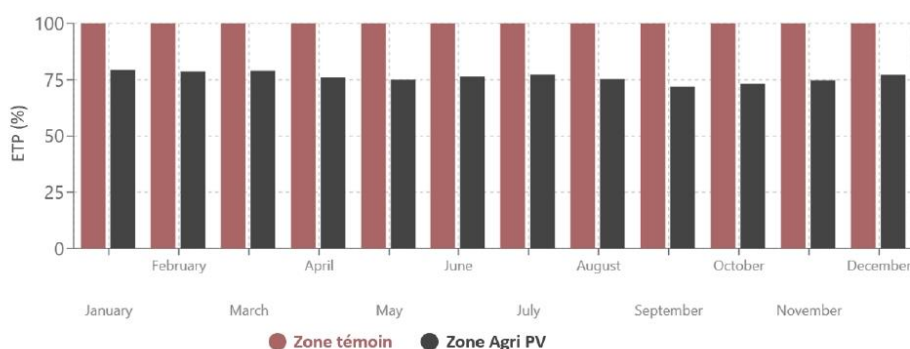


Figure 21 : ETP du blé en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo).

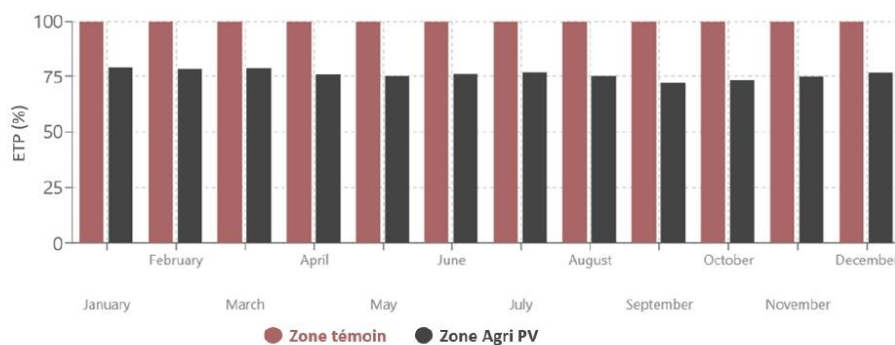


Figure 22: ETP de l'orge d'hiver en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo).

Le système agriphotovoltaïque permet une ETP inférieure à celle de la zone témoin à chaque stade de développement du blé tendre et de l'orge d'hiver, d'au minimum 20%.

En effet, l'ETP moyen annuel est de 76 % pour le système agriphotovoltaïque pour le blé tendre et l'orge d'hiver.

Une diminution de l'ETP à chaque stade de développement du blé tendre et de l'orge d'hiver va limiter le stress hydrique de ces cultures, les pertes en eau seront moins importantes et il y aura donc davantage d'eau disponible pour le système sol-plante.

Réserve en eau



Les graphiques ci-dessous représentent la réserve en eau du sol exprimé en % sur une base 100 % (réserve d'eau maximale permise dans le contexte pédoclimatique du projet) de la zone témoin, du système agrivoltaïque.

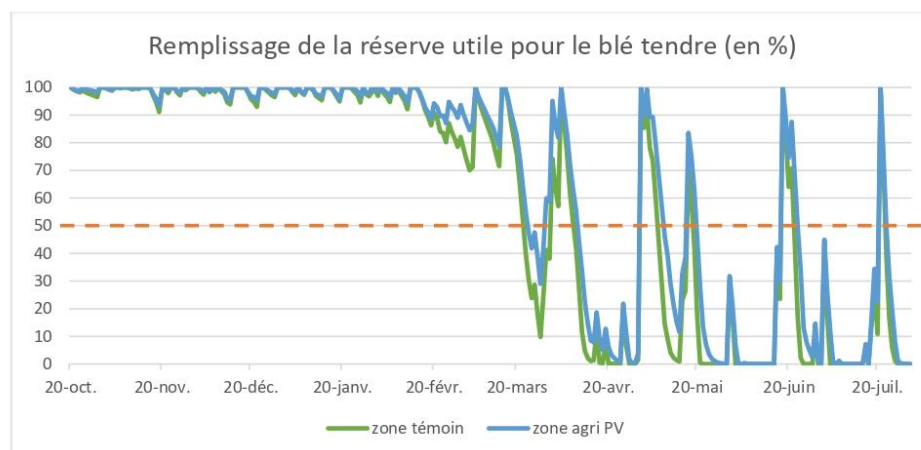


Figure 23 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps du blé tendre de la zone témoin et de la zone agri PV (Source : Optisoleo)

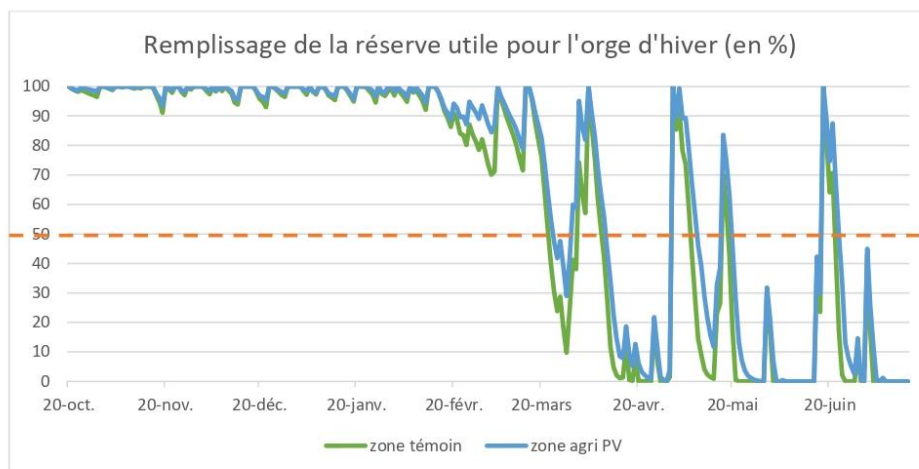


Figure 24 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps de l'orge d'hiver de la zone témoin et de la zone agri PV (Source : Optisoleo).

Le stress hydrique correspond au moment où la plante doit puiser dans la réserve de survie (RS dans le graphique ci-dessous, seuil de 50% de la RU symbolisé par la ligne en pointillés orange). Cette situation qui compte de nombreux jours de stress hydrique s'explique par la très faible profondeur de la réserve utile (20mm), celle-ci se vide rapidement. Toutefois, elle peut se remplir aussi rapidement, c'est d'ailleurs ce que l'on peut observer sur le graphique avec les quelques pics occasionnels.

Le blé tendre et l'orge d'hiver de la zone témoin sont bien confrontés à un stress hydrique en mars, en avril, fin mai et de la mi-juin jusqu'à leur récolte. La présence panneaux en limitant l'évapotranspiration permet de conserver le stock en eau du sol plus longtemps.

Stress hydrique



Le tableau ci-dessous reprend le nombre de jours de stress hydrique du blé tendre et de l'orge d'hiver par stade de développement pour les deux systèmes agrivoltaïques par rapport au témoin.

Légende du tableau ci-dessous :

- Effet très positif sur le blé tendre et l'orge
- Effet positif pour le blé tendre et l'orge
- Effet neutre pour le blé tendre et l'orge
- Effet légèrement négatif pour blé tendre et l'orge
- Effet négatif pour blé tendre et l'orge

	Blé tendre		Orge d'hiver	
	Zone témoin	Système agrivoltaïque	Zone témoin	Système agrivoltaïque
Semis-Levée	6 jours	6 jours	6 jours	6 jours
Levée-Plein tallage_1	0 jours	0 jours	0 jours	0 jours
Levée-Plein tallage_2	0 jours	0 jours	0 jours	0 jours
Plein tallage - 2 nœuds	52 jours	35 jours	52 jours	35 jours
2 nœuds-Épiaison	41 jours	41 jours	41 jours	41 jours
Épiaison - Début remplissage	17 jours	17 jours	17 jours	17 jours
Début remplissage - Grain pâteux	28 jours	28 jours	20 jours	20 jours
Maturation	11 jours	11 jours	11 jours	11 jours

Tableau 4 : Nombre de jours de stress hydrique du blé tendre et de l'orge d'hiver par stade pour les trois systèmes, source : Optisoleo

Les panneaux semblent réduire le stress hydrique subit par l'orge et le blé d'hiver uniquement lors de la phase de Plein tallage - 2 nœuds). Les panneaux ne permettent pas de réduire l'occurrence du stress hydrique pour les autres stades de développement, notamment ceux de remplissage des grains, or c'est à ces stades finaux de développement que les rendements des céréales sont particulièrement impactés par le stress hydrique. Cela est a priori principalement dû au fait que la RU est tellement faible sur le site (20 mm) que même avec de l'ombrage, elle se vide rapidement.

Irradiance

Les graphiques ci-dessous présentent l'irradiance journalière en W / m² entre la zone témoin et la zone d'installation. Les résultats sont présentés de l'implantation du blé d'hiver et de l'orge jusqu'à leur récolte.

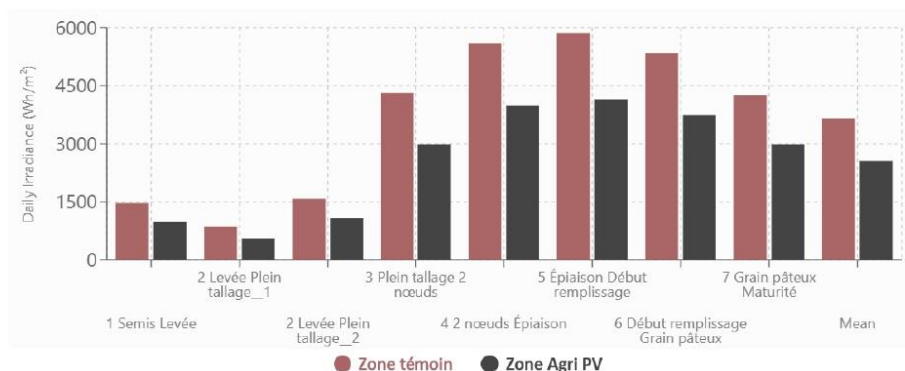


Figure 25 : Irradiance journalière en W / m² pour le blé d'hiver en zone témoin et en zone Agri PV (Source : Optisoleo)

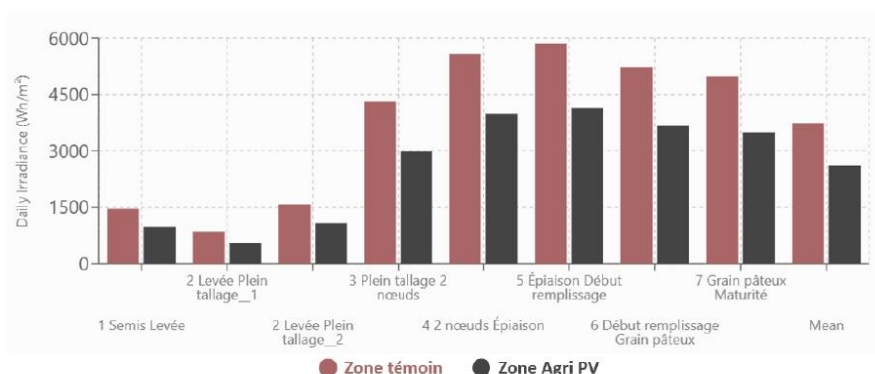


Figure 26 : Irradiance journalière en W / m² pour l'orge d'hiver en zone témoin et en zone Agri PV (Source : Optisoleo)

Comme on pouvait le prévoir, l'installation agrivoltaïque apporte de l'ombre et impacte donc la part de rayonnement perçu par les cultures. On remarque ainsi que tout au long du cycle du blé tendre et de l'orge d'hiver il y a une perte d'irradiance. En moyenne, la perte d'irradiance journalière est de 31% pour les deux cultures.

Pour les céréales à pailles que sont l'orge et le blé, les rayonnements lumineux sont les plus importants à partir de la floraison. Or, cette perte d'irradiance peut impacter ces céréales et leurs rendements.

Il est aussi important de noter que cette perte d'irradiance permet de limiter l'évapotranspiration et le stress hydrique et thermique. La rotation des panneaux pourra être spécifiquement

adaptée lors de la phase de floraison afin de maximiser le potentiel de rendement du blé et de l'orge d'hiver.

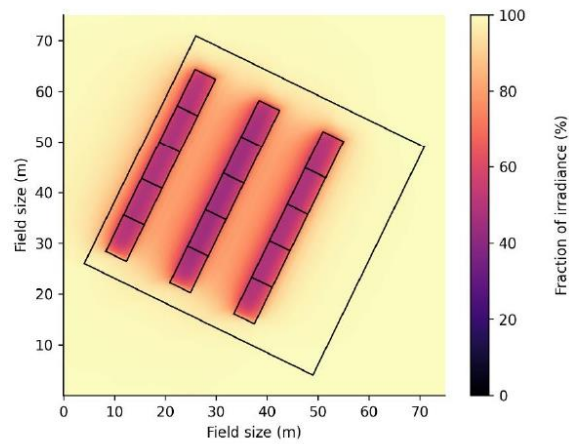


Figure 27 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Agrisoleo).

Pour les céréales à paille, les rayonnements lumineux sont les plus importants à partir de la

Il est toutefois important de noter que cette perte d'irradiance permet de limiter l'évapotranspiration et le stress hydrique et thermique. La rotation des panneaux pourra être spécifiquement adaptée lors de la phase de floraison afin de maximiser le potentiel de rendement des céréales.

5.2.2. Synthèse des synergies agricoles pour le blé et l'orge

Légende du tableau ci-dessous qui synthétise les impacts des trackers sur le blé tendre et son développement :

- Effet très positif sur le blé tendre et l'orge
- Effet positif pour le blé tendre et l'orge
- Effet neutre pour le blé tendre et l'orge
- Effet légèrement négatif pour le blé tendre et l'orge
- Effet négatif pour le blé tendre et l'orge

Tableau 5 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur le blé tendre et l'orge d'hiver

	Impact Installation agri PV
Stress thermique	Diminution du nombre de jours de stress thermique, surtout en fin de cycle qui devrait favoriser le remplissage des grains
ETP	Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Stress hydrique	Réduction du stress hydrique à des stades préliminaires de développement, mais pas aux stades critiques de fin de cycle
Irradiance	La diminution d'irradiance permet de limiter le stress thermique et d'améliorer la résilience aux sécheresses mais peut potentiellement avoir un effet négatif lors de certaines phases notamment la floraison. La rotation des panneaux pourra être adaptée lors de ce stade en fonction des premiers résultats obtenus.

La modélisation a été effectuée en « full tracking solaire », si le rendement est impacté alors une optimisation sur le pilotage des panneaux devra être faite.

Il est important de noter qu'il existe actuellement peu de références sur l'impact de l'ombrage sur le blé et l'orge et que les sources existantes sont dans des zones pédoclimatiques différentes de celles du projet avec des choix techniques différents. En effet, il n'existe pas de suivis réalisés sur des grandes cultures avec trackers surélevés (cf. Tableau 6 ci-dessous).

Cependant, en conditions plutôt sèches, une amélioration des rendements est constatée avec la présence d'ombrage alors qu'en bonnes conditions de potentiel de rendement et en climat plutôt humide, l'effet est plutôt négatif.

Par ailleurs, il est important de mentionner que toutes les variétés ne répondent pas de la même manière à la présence d'ombrage, certaines sont plus tolérantes que d'autres, le choix variétal sera donc essentiel dans les projets agrivoltaïques et demande un travail d'approfondissement des connaissances sur les variétés.

Dans le contexte pédoclimatique du projet avec une très faible réserve utile des sols et une sensibilité importante aux sécheresses de plus en plus fréquente, l'impact de l'ombrage devrait être bénéfique sur le rendement du blé et de l'orge. En fonction des retours d'expérience sur

les démonstrateurs déjà en place, une adaptation de la rotation des panneaux à certains stades de la culture pourra être mise en place.

Tableau 6 : Impact de l'ombrage sur la culture du blé

Localisation culture	Allemagne Blé tendre	Belgique Blé tendre de printemps et d'hiver	France Blé (Sensas) Orge (Amistar)	France Blé (complice)	Espagne Blé (9 variétés) Orge (9 variétés)
Type de panneaux	Ombrières Hauteur : 5 mètres	Ombrières Hauteur : 5 mètres / inter-rang : 13 m	Panneaux verticaux	Panneaux verticaux	Sous serre avec voile d'ombrage
Taux d'ombrage	Lumière disponible : 60 % du PAR	30%	14%	18%	10% et 50%
Rendements	↘ 18,7% en 2017 ↗ 2,7% en 2018 (année chaude et sèche) ↘ 8% en moyenne sur les deux années et 8% de perte de surfaces exploitées ≈ Pas de réduction significative sur les rendements en année chaude et sèche <i>Rendement du témoin : 57 q/ha en 2017, 46 q/ha en 2018 (site conduit en</i>	↘ 33% en 2022 pour le blé de printemps (-1,7 t/ha en zone forte irradiance et - 1,5 t/ha en zone faible irradiance ↘ 46% en 2023 pour le blé d'hiver (-1,7 t/ha en zone forte irradiance et -1,4 t/ha en zone de faible irradiance Avec une perte de surface exploitées de 8% et un sol compacté à cause des travaux de construction <i>Rendement du témoin : 46 q/ha en 2022, 36 q/ha en 2023</i>	↗ 10% pour le blé ↗ 8% pour l'orge Rendement du témoin : 19 q/ha en blé et 20 q/ha en orge (site conduit en agriculture biologique)	↗ 15% de rendement Rendement du témoin : 29 q/ha	↗ 19% pour le blé et ↗ 2% pour l'Orge à 10% d'ombrage ↗ 19% pour le blé et ↗ 19% pour l'Orge à 50% d'ombrage Importantes différences variétales : sur le blé, 7 variétés sur 9 présentent une amélioration de rendement à 50% de diminution d'irradiance avec jusqu'à 10 q/ha de plus <i>Rendement du témoin : 28 q/ha en blé et 30 q/ha en orge</i>

	agriculture biologique)				
Qualité de la production	↘ Diamètre des grains sous panneaux en 2018 ↘ PMG les 2 années sous panneaux ↗ Hauteur du couvert sous panneaux ↘ Retard de croissance non significatif en 2018 invisible à la récolte	≈ Stabilisation de la qualité des grains, la teneur en protéines et la morphologie des plantes sous les panneaux les 2 années ↘ 17% nombre de grains par épi en 2022 (non significatif) ↗ 12% nombre de grains par épi en 2023 (non significatif)	↗ 2,8% du poids de mille grains pour l'orge Possible ↗ du taux de protéines, pour l'orge, niveau maintenu pour le blé	↗ de la taille des plantes dans la zone AgriPV par rapport à la zone ombragée	

5.3. Luzerne

5.3.1. Analyse des indicateurs agro-climatiques

Stress thermique

Ci-dessous, est présenté le nombre de jour de stress thermique ($T > 25^{\circ}\text{C}$) par stade de développement de la luzerne de la zone témoin et du système agrivoltaïque avec inter-rang de 14 mètres.

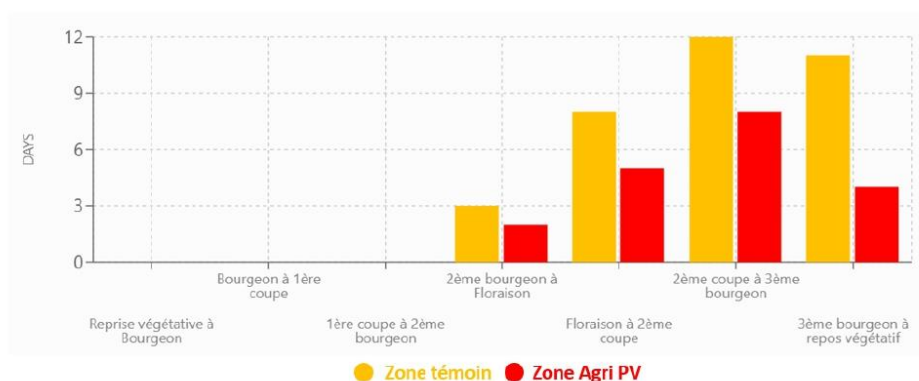


Figure 28 : nombre de jours de stress thermique de la luzerne par stade de développement de la zone témoin sans panneaux, de celle avec inter-rang de 14m (source : Optisoleo)

Le système agrivoltaïque permet une diminution du nombre de jours de stress thermique par rapport au témoin, et ce quel que soit le stade de la luzerne. On remarque ainsi qu'en zone agriPV le nombre de jours de stress thermique diminue de 33% au stade « deuxième bourgeon à la floraison », de 37,5% au stade « Floraison à deuxième coupe », de 33% au stade « deuxième coupe à troisième bourgeon » et de 63% au stade « 3ème bourgeon à repos végétatif ».

Le stress thermique implique des températures supérieures à 25 degrés, seuil à partir duquel la pousse de l'herbe diminue fortement, c'est donc un indicateur pertinent si l'on veut évaluer l'impact du système agrivoltaïque sur les rendements en luzerne.

Avec une diminution du nombre de jours de stress thermique à chaque stade concerné par le phénomène, le système agrivoltaïque, est bénéfique à la croissance de la luzerne.

Évapotranspiration (ETP)

Le graphique ci-dessous combine les résultats de l'ETP de la zone témoin, du système agrivoltaïque. Ils sont présentés pour les différents stades de développement de la luzerne, reprenant par stade l'ETP de la zone témoin et celle du système agrivoltaïque.

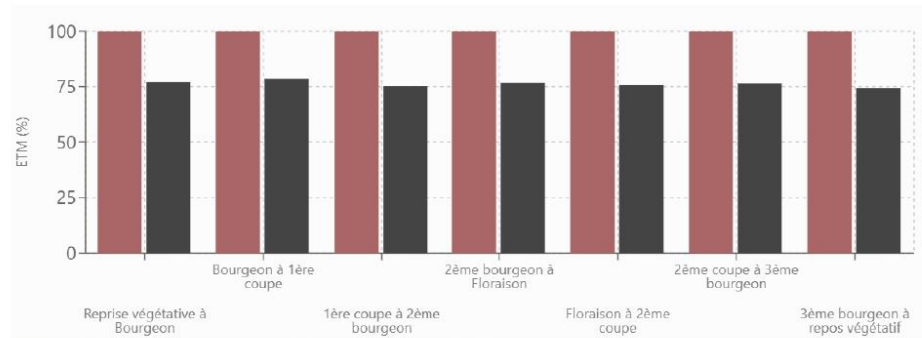


Figure 29 : ETP de la luzerne en % pour la zone témoin et la zone avec inter-rang de 14m par stade de développement (source : Optisoleo)

Le système agrivoltaïque permet une ETP inférieure à celle de la zone témoin à chaque stade de développement du colza, d'au minimum 20%.

En effet, l'ETP moyen annuel est de 76 % pour le système agrivoltaïque par rapport à la luzerne en zone témoin.

Une diminution de l'ETP à chaque stade de développement de la luzerne va limiter le stress hydrique de la culture, les pertes en eau seront moins importantes et il y aura donc davantage d'eau disponible pour le système sol-plante

Réserve en eau

Sur ce graphique, il convient d'abord de regarder s'il y a un stress hydrique. Si oui, ce stress hydrique est-il réduit ou supprimé avec les systèmes agrivoltaïques pour affirmer que ces derniers soient bénéfiques à la culture ?

La luzerne de la zone témoin est bien confrontée à un stress hydrique à partir du mois d'avril. La culture subit de nouveau le phénomène de stress hydrique de manière récurrente chaque mois jusqu'à la fin du mois d'octobre.

Le stress hydrique correspond au moment où le niveau de la réserve utile atteint moins de 50% de sa capacité (matérialisé par la ligne orange en pointillés sur le graphique). On notera ici que la réserve utile est souvent vide.

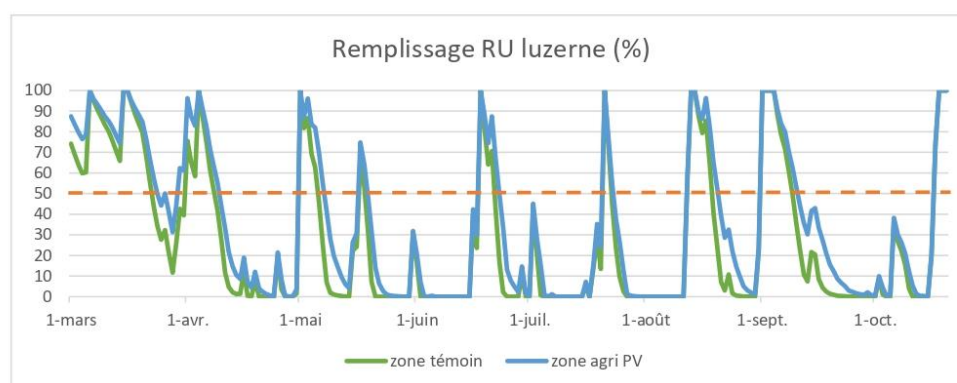


Figure 30 : Réserve en eau exprimé en % sur une base 100 dans le temps pour la zone témoin, la zone avec inter-rang de 14 m pour la luzerne (source : Optisoleo)

On remarque toutefois grâce à ce graphique que la réserve utile se vide moins rapidement en zone agriPV qu'en zone témoin.

Stress hydrique


Le tableau ci-dessous reprend le nombre de jours de stress hydrique du colza par stade de développement pour les deux systèmes agrivoltaïques par rapport au témoin.

Légende du tableau ci-dessous :

- Effet très positif sur la luzerne
- Effet positif pour la luzerne
- Effet neutre pour la luzerne
- Effet légèrement négatif pour la luzerne
- Effet négatif pour la luzerne

Tableau 7 : Nombre de jours de stress hydrique de la luzerne par stade de développement
 (source : Optisoleo)

	Zone témoin	Système agrivoltaïque
Reprise végétative à Bourgeon	0 jours	0 jours
Bourgeon à 1 ^{ère} coupe	15 jours	2 jours
1 ^{ère} coupe à 2 ^{ème} bourgeon	27 jours	27 jours
2 ^{ème} bourgeon à Floraison	27 jours	27 jours
Floraison à 2 ^{ème} coupe	23 jours	23 jours
2 ^{ème} coupe à 3 ^{ème} bourgeon	41 jours	41 jours
3 ^{ème} bourgeon à repos végétatif	69 jours	62 jours

Les panneaux semblent réduire le stress hydrique subi par la luzerne lors de la deuxième phase de développement (phase Bourgeon à 1^{ère} coupe) et lors du dernier stade de développement (3^{ème} bourgeon à repos végétatif). Du fait de la faible réserve utile du sol, à certains stades il n'y a pas de différences entre zone témoin et zone agriPv.

Irradiance

Le graphique ci-dessous présente d'irradiance journalières en W / m^2 entre la zone témoin et la zone d'installation. Les résultats sont présentés de l'implantation du colza à sa récolte.

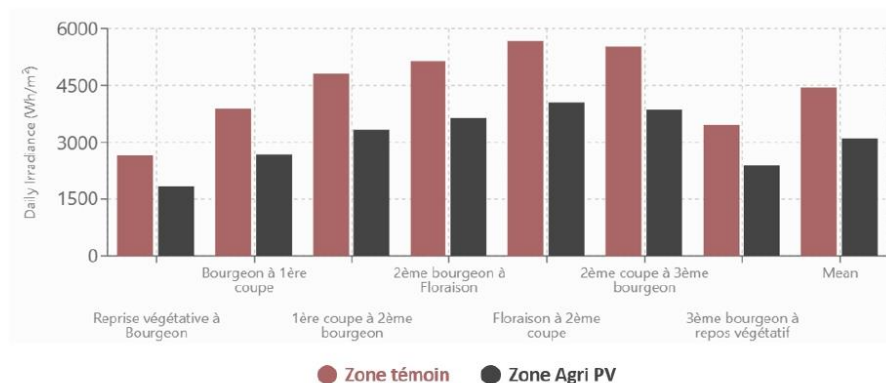


Figure 31 : Irradiance journalière en W / m^2 pour la luzerne en zone témoin et en zone Agri PV (source : Optisoleo)

Comme on pouvait le prévoir, l'installation agrivoltaïque apporte de l'ombre et impacte donc la part de rayonnement perçu par les cultures. On remarque ainsi une perte d'irradiance tout au long du cycle de la luzerne. En moyenne, la perte d'irradiance journalière est de 30% en moyenne.

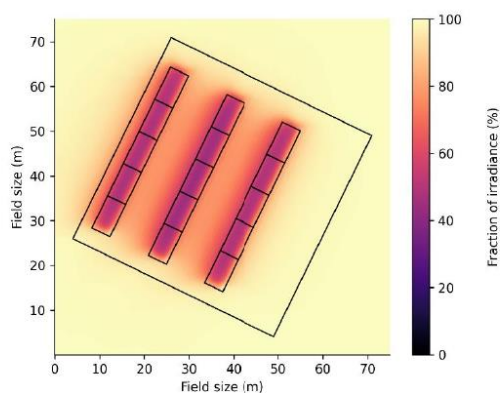


Figure 32 : Part d'irradiance en % sur la surface du projet agrivoltaïque (source : Optisoleo).

Pour la luzerne, les rayonnements lumineux sont les plus importants à partir de la floraison. Or, cette perte d'irradiance peut impacter la luzerne et potentiellement son rendement.

Il est toutefois important de noter que cette perte d'irradiance permet de limiter l'évapotranspiration et le stress hydrique et thermique. La rotation des panneaux pourra être

spécifiquement adaptée lors de la phase de floraison afin de maximiser le potentiel de rendement de la luzerne.

5.3.2. Synthèse des synergies agricoles pour la luzerne

Légende du tableau ci-dessous qui synthétise les impacts des trackers sur le colza et son développement :

	Effet très positif sur la luzerne
	Effet positif pour la luzerne
	Effet neutre pour la luzerne
	Effet légèrement négatif pour la luzerne
	Effet négatif pour la luzerne

Tableau 8 : Synthèses des impacts de l'installation agrivoltaïque sur la luzerne

	Système agrivoltaïque
Stress thermique	Diminution du nombre de jours de stress thermique, surtout en fin de cycle qui devrait favoriser la production de biomasse.
ETP	Diminution de l'évapotranspiration
Réserve en eau	Maintien plus longtemps de la réserve en eau, meilleure résilience à la sécheresse
Stress hydrique	Limitation du nombre de jours de stress hydrique à certains stades.
Irradiance	La diminution d'irradiance permet de limiter le stress thermique et d'améliorer la résilience aux sécheresses mais peut potentiellement avoir un effet négatif lors de certaines phases notamment la floraison. La rotation des panneaux pourra être adaptée lors de ce stade en fonction des premiers résultats obtenus.

La modélisation a été effectuée en « full tracking solaire », si le rendement est impacté, alors une optimisation sur le pilotage des panneaux devra être faite.

Il est important de noter qu'il n'existe actuellement qu'une seule avec des résultats de rendements publiés sur du colza menée en agrivoltaïsme (Edouard, 2022) avec une réduction d'irradiance comprise entre 37 et 48% en fonction des zones. Sur le site un gain de rendement moyen de 10% en moyenne sur 2 ans a été constaté. Les premiers projets mis en place permettront d'améliorer les connaissances sur l'impact de l'ombrage sur le colza et d'adapter la rotation des panneaux en fonction des besoins de la culture.

Tableau 9 : Impact de l'ombrage sur la culture de la luzerne

Localisation	Type de panneaux	Taux d'ombrage	Rendements	Qualité de la production
France (77)	Ombrières Trackers bi-axial	Entre 37 et 48% de perte d'irradiation (taux de couverture de 37%)	↘ 21% en 2021 ↗ 40% en 2022 (année chaude et sèche) ↗ 10% en moyenne sur les deux années <i>Effet positif de réduction des périodes de stress thermique et de gel printanier selon les auteurs</i>	Pas d'analyse qualité. Augmentation de la surface des feuilles et elongation pour s'adapter au manque de lumière.

VI- Synthèse des synergies agricoles rendus par le projet

En synthèse, les deux systèmes agrivoltaïques expérimentaux mis en place sur le projet de Saulvaux auront bien des effets bénéfiques sur les cultures de la rotation du projet selon l'analyse de plusieurs indicateurs agro-climatiques et les modélisation effectuées. L'intensité des bénéfices apportés par les trackers varient pour chaque culture et sont propres à chacune.

Cette étude a pour objectif de répondre au critère sur l'apport de services agricoles au regard du décret sur l'agrivoltaïsme :

- « La technologie photovoltaïque fournit au moins l'un des services mentionnés aux 1^o à 4^o du II de l'article L. 314-36 du code de l'énergie, conformément aux conditions des articles R. 314-110 à R. 314-113 du même code. En outre, il doit être prouvé que le projet ne porte pas une atteinte substantielle à l'un de ces services ou une atteinte limitée à deux de ces services. Les services considérés sont les suivants :
1. L'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques ;
 2. L'adaptation au changement climatique ;
 3. La protection contre les aléas ;
 4. L'amélioration du bien-être animal. »

Le tableau suivant synthétise les résultats :

Services	Projet agrivoltaïque de Saulvaux
L'amélioration du potentiel et de l'impact agronomiques	Pas d'atteinte limitée ou substantielle Le potentiel agronomique du sol ne sera a priori pas impacté avec la mise en place de pieux battus
L'adaptation au changement climatique	Service rendu par l'installation Dans un contexte d'augmentation des températures et de l'évapotranspiration, la présence de panneaux permettra de limiter les températures et de conserver l'eau plus longtemps dans le sol pour imiter le stress hydrique des plantes
La protection contre les aléas	Service rendu par l'installation Protection contre les températures extrêmes et contre les sécheresses.
L'amélioration du bien-être animal	Non concerné

La mise en place de trackers permettra d'adapter la rotation des panneaux en fonction des besoins des plantes en fonction des futurs retours d'expérience et des conditions climatiques de l'année. Des panneaux mobiles laissent la possibilité d'adapter le système de de l'améliorer dans le temps.

Sur des zones comme à Saulvaux où la RU est très faible et les parcelles très sensibles au stress hydriques, les panneaux devraient avoir des effets bénéfiques sur les cultures.

VII- Bibliographie

- Arvalis, 2022. Les essentiels d'Arvalis, articles et infos techniques. Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ? [En ligne]
- Arvalis, 2013. Les essentiels d'Arvalis, articles et infos techniques. Une sécheresse à partir de fin montaison pénalise fortement le potentiel de rendement. [En ligne]
- Arvalis, 2023. Quel impact de la sécheresse sur les céréales d'hiver ? [En ligne]
- Arvalis, 2017. Les essentiels d'Arvalis, articles et infos techniques. Comprendre l'impact des conditions de fin de cycle sur trois paramètres. [En ligne]
- Arvalis, 2017. Réussir l'implantation d'une luzerne. [En ligne]
- Arvalis, 2024. Les essentiels d'Arvalis, articles et infos techniques. Comment réagissent les céréales face au froid ? [En ligne]
- Arvalis, 2021. Les essentiels d'Arvalis, articles et infos techniques. Changement climatique : les leviers d'adaptation pour les céréales.
- Brunel-Muguet, S., Beauclair, P., Bataillé, MP. et al. Light Restriction Delays Leaf Senescence in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *J Plant Growth Regul* 32, 506–518 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9317-9>
- Carbone 4, Florine Ollivier-Henry, Clément Ory, 2024. Analyse de la résilience d'une culture, exemple du colza, dans un contexte agro-climatique. [En ligne]
- Climadiag. [En ligne] <https://climadiag-agriculture.fr/>
- Climadiag. Indicateurs - Pourquoi des indicateurs ? <https://climadiag-agriculture.fr/indicateurs>
- Edouard, Sylvain, et al. "Increasing land productivity with agriphotovoltaics: Application to an alfalfa field." *Applied Energy* 329 (2023): 120207.
- Intercéréales, 2021. Réchauffement climatique : quelles sont les conséquences sur l'agriculture céréalière ? [En ligne]
- Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J. et al. Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforest Syst* 93, 1821–1841 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>
- Le Colza. Agri-production, éditions France Agricole 2013, Prolea CETIOM. Productions végétales et grandes cultures.
- Philippe P. Debaeke, Jean-Louis Puech, M.L. Casals. Elaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. I. Etude en lysimètres. *Agronomie*, 1996, 16 (1), pp.3-23. [ffhal02693123f](https://hal.inrae.fr/hal-02693123f). [En ligne] <https://hal.inrae.fr/hal-02693123/document>
- Reher, Thomas, et al. "Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium." *Applied Energy* 359 (2024): 122679.
- Terres Inovia. 2023. Guide de culture du colza. [En ligne]
- Terres Inovia. 2024. Accidents climatiques sur colza : le manque ou l'excès d'eau. [En ligne]
- Terres Inovia. 2023. Produire avec l'agroécologie > Changement climatique : atténuation et adaptation au changement climatique, Quelles sont les stratégies pour augmenter la robustesse des cultures et la résilience des systèmes ? [En ligne]
- Terres Inovia. 2023. Irriguer le soja : pourquoi et comment ? [En ligne]

Tiffon-Terrade, Benjamin, et al. "Vertical agrivoltaics system on arable crops in Central France: feedback of the first year of operation." AgriVoltaics Conference Proceedings. Vol. 2. 2023.

Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J. et al. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. Agron. Sustain. Dev. 41, 59 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>