

Optimisation d'un système agrivoltaïque

Elio Duclos, Philippe Dessante, Kylian Minck, Anne Migan Dubois
Université Paris-Saclay et Sorbonne Université, CentraleSupélec, CNRS,
Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192 Gif-sur-Yvette, France.

RÉSUMÉ – Cet article se concentre sur l'étude des systèmes agrivoltaïques afin de comprendre les facteurs influençant leur performance. L'objectif principal est d'optimiser les paramètres géométriques et les stratégies de commande pour améliorer simultanément plusieurs critères de performance. Les résultats des optimisations menées ont permis d'identifier des valeurs de commande angulaires qui maximisent le rendement agricole. Notamment, il a été démontré que des panneaux verticaux sont optimaux dans le cas d'une installation à inclinaison fixe, tandis qu'un contrôle anti-solaire s'avère optimal dans le cas d'une inclinaison variable. Ces configurations ont pour effet de minimiser l'ombre projetée sur les cultures, facteur clé pour améliorer la production agricole. De plus, des résultats obtenus pour une optimisation multi-objectif sur le rendement agricole et la production d'énergie solaire indiquent que le couplage agrivoltaïque est pleinement concurrentiel sans effets bénéfiques pour les cultures dans le cas d'un faible stress thermique et hydrique. Cela nous amènera à complexifier le modèle de couplage et à étendre l'étude à des conditions climatiques plus stressantes pour les cultures, afin de vérifier la généralité de ces conclusions.

Mots-clés – Agrivoltaïsme, Optimisations, Photovoltaïque, Systèmes de production agricole, Modélisation, Multi-objectif

1. PRÉSENTATION DE L'AGRIVOLTAÏSME ET DES OBJECTIFS DE CET ARTICLE

L'agrivoltaïsme (AV), ou co-utilisation d'un même espace foncier pour la production agricole et la génération d'électricité photovoltaïque (PV), suscite un intérêt croissant dans les communautés scientifique et industrielle. Selon l'article L314-36 [1] du Code de l'énergie, une installation agrivoltaïque se définit comme une installation de production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil et dont les modules sont situés sur une parcelle agricole où ils contribuent durablement à l'installation, au maintien ou au développement d'une production agricole.

Au-delà de cette définition réglementaire, l'agrivoltaïsme est désormais compris, dans la littérature scientifique, comme un système complexe d'interactions entre les cultures et les infrastructures PV. De nombreuses études ont rapporté des effets bénéfiques potentiels de ces installations, notamment en termes de réduction de l'évapotranspiration [2], de modération du microclimat [3] ou d'amélioration de certaines qualités agronomiques comme le rendement agricole [4], [5]. Ces résultats suggèrent que, dans certaines conditions, les AVS peuvent concilier production agricole et énergétique sans perte de performance.

Cependant, d'autres travaux font état d'effets négatifs ou ambigus sur les rendements agricoles. Par exemple, une diminution moyenne de la biomasse de 22 % a été observée sur une parcelle AV par rapport à un témoin non équipé [6], tandis que des résultats contradictoires ont été constatés selon les emplacements sous ou entre les panneaux [4]. Des effets variables selon les espèces cultivées [4] ou des modifications morphologiques des plantes [7], [8] ont également été rapportés. Il convient de souligner que certaines de ces observations relèvent plus largement de la réponse des plantes aux contraintes environnementales qu'à l'agrivoltaïsme en tant que tel [9].

Ces divergences indiquent une forte dépendance des performances des AVS aux conditions locales, aux espèces cultivées et aux paramètres de conception des installations photovoltaïques. Une meilleure compréhension des mécanismes physiques et biologiques en jeu, ainsi que des marges de manœuvre disponibles pour les concepteurs et exploitants, apparaît donc indispensable.

L'objectif du présent article est de proposer une première exploration de la conception optimale d'un système agrivoltaïque associant une culture de luzerne et une centrale PV sur un site expérimental. Nous cher-

chons à évaluer la sensibilité du système aux conditions environnementales et à identifier les leviers de pilotage permettant une co-optimisation robuste des productions agricole et énergétique. Après une première analyse centrée sur l'optimisation de l'inclinaison des panneaux pour maximiser la biomasse, nous élargirons notre étude à la production électrique afin d'évaluer les synergies et antagonismes potentiels entre les deux usages.

2. CONFIGURATION DU SYSTÈME AGRIVOLTAÏQUE SIMULÉ

Le cas d'étude porte sur un système agrivoltaïque associant une culture de luzerne (*Medicago sativa*) de variété 'Milky Max' et une centrale photovoltaïque installée en surplomb. Cette légumineuse fourragère a été choisie en raison de son intérêt agro-environnemental, de sa plasticité face aux conditions climatiques, et de sa forte demande en eau, qui en fait un choix pertinent pour évaluer les impacts microclimatiques des installations AVS, et en fait par ailleurs une espèce modèle particulièrement adaptée à la généralisation des résultats obtenus, notamment pour des analyses de sensibilité ou des extrapolations à d'autres contextes agroclimatiques.

L'installation photovoltaïque simulée se compose de quatre rangées de panneaux solaires bifaciaux orientables suivant un axe Nord-Sud. Ceux-ci sont équipés d'un système de backtracking à un seul axe, permettant d'optimiser la captation du rayonnement tout en limitant les ombrages. Cette configuration offre une opportunité d'analyse conjointe des flux radiatifs, des effets thermiques induits et des impacts sur la croissance végétale. L'installation comprend 18 modules photovoltaïques par rangée, répartis sur un terrain de 20 mètres par 23,5 mètres, avec un espacement inter-rang de 5,5 mètres.



FIG. 1. Vue du champ expérimental du SIRTa ayant servi de référence géométrique pour la modélisation.

La première phase de l'étude repose sur les données météorologiques mesurées sur le champ expérimental du SIRTa (France), qui a également servi de référence géométrique pour la configuration du système simulé. Cette phase de validation a permis de confronter les résultats issus du modèle à un contexte climatique réel, afin de s'assurer de la cohérence des comportements simulés avec des observations expérimentales.

Dans un second temps, la modélisation a été appliquée à des scénarios climatiques synthétiques élaborés à partir de données de la Caroline du Nord, sélectionnées pour leur résolution temporelle fine et leur fiabilité. Ces données ont été modifiées à l'aide de coefficients correcteurs afin de générer des climats réalistes et variés, permettant d'évaluer la sensibilité du système à différentes conditions agroclimatiques. Enfin, les différentes configurations obtenues pour l'installation ont été testées dans un contexte réaliste, simulant un fonctionnement fondé sur les données météorologiques observées sur le site expérimental du SIRTa.

3. MODÉLISATION

L'évaluation des performances agrivoltaïques repose sur un modèle couplé intégrant les composantes climatiques, photovoltaïques et agronomiques du système étudié. Ce modèle systémique est implémenté en Python et repose sur l'interaction de sous-modèles distincts, permettant une simulation intégrée du fonctionnement d'un système AV.

- Le modèle prend en compte :
- les données climatiques (température ambiante, humidité, précipitations, rayonnement solaire global/direct/diffus),
 - un module de calcul du rayonnement et de l'ombrage sur les cultures à partir de la position des panneaux,
 - un modèle agro-physiologique de croissance des plantes tenant compte des contraintes radiatives et thermiques,
 - un modèle de production photovoltaïque simulant la génération électrique en conditions dynamiques.

La figure 2 illustre la structure du modèle couplé. Les modules développés spécifiquement pour cette étude sont indiqués en rouge. Le couplage est assuré sur une base horaire, chaque sous-modèle recevant en entrée les sorties actualisées des autres modules, ce qui permet une prise en compte des rétroactions (par exemple : influence de l'ombrage sur l'irradiance perçue par le couvert végétal).

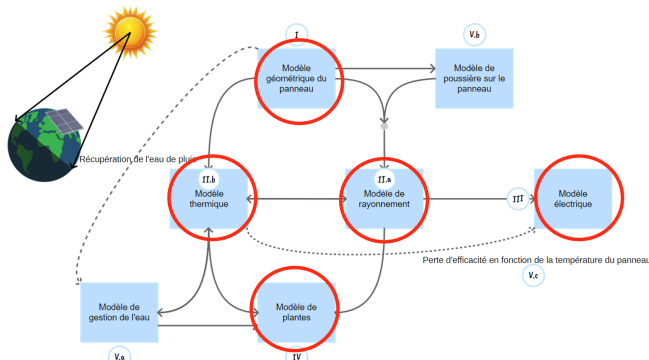


FIG. 2. Schématisation du modèle global et des sous-modèles couplés

Le module de croissance végétale est basé sur LAWSTAC[10], initialement développé en MATLAB puis adapté en Python pour cette étude, avec une calibration sur la culture de luzerne. Celui-ci utilise le modèle de pousse de plante EPIC, définissant une quantité de biomasse linéaire en fonction de l'irradiance reçu par le couvert. La partie photovoltaïque repose sur la bibliothèque `pvl`[11], et plus précisément sur le modèle PVWatts[12], permettant une estimation réaliste de la production électrique en fonction de l'inclinaison des modules et des conditions radiatives.

Ce couplage permet ainsi d'évaluer, pour chaque configuration de l'installation et chaque scénario climatique, l'évolution conjointe de la biomasse végétale et de la production d'énergie électrique.

4. VALIDATION DU MODÈLE PAR CONFRONTATION AUX DONNÉES EXPÉRIMENTALES DU SIRTÀ

Afin d'évaluer la pertinence du modèle couplé présenté précédemment, une phase de validation a été menée par comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur le site du SIRTÀ. L'analyse porte sur une période de 76 jours, allant du 14 juin au 28 août, pendant laquelle les conditions météorologiques ont été enregistrées à haute résolution à l'aide des instruments de la plateforme d'observation. Sur cette période, la température moyenne observée était de 19,4 °C et l'irradiance globale moyenne de 227 W/m².

Les paramètres biologiques du modèle ont été ajustés pour représenter la luzerne (*Medicago sativa*), en se basant sur la littérature (cf. Tableau 1). Une comparaison directe est réalisée avec les valeurs précédemment utilisées pour le blé, plante initialement modélisée dans LAWSTAC. Ces paramètres concernent la phénologie, la structure végétative, la capacité photosynthétique et le développement racinaire.

Paramètre	Luzerne	Blé
<i>Paramètres de température et développement</i>		
Température de base (T_b) [°C]	5 [13]	2
Température optimale (T_0) [°C]	25 [14]	20
<i>Paramètres de structure végétative</i>		
LAI_{max}	5.5 [15]	7.1
Hauteur maximale (H_{max}) [cm]	100 [14]	96
<i>Paramètres de production et d'utilisation des ressources</i>		
BE [kg MS·MJ·m ⁻²]	17 [15]	31
Coefficient d'extinction (β)	0,88 [15]	0.55
<i>Paramètres racinaires</i>		
Profondeur racinaire (RD_{max}) [cm]	180 [16]	100

TAB. 1. Paramètres agronomiques de la luzerne et du blé (valeurs par défaut de LAWSTAC pour le blé) pour le modèle LAWSTAC. LAI : Indice de surface foliaire (m²/m²), BE : paramètre de conversion énergie/biomasse

Trois configurations expérimentales sont considérées selon l'intensité de l'ombrage [6] :

- *contrôle* (zone sans panneau),
- *ombrage moyen* (zone inter-panneaux),
- *ombrage fort* (sous les panneaux).

La Figure 3 compare la biomasse sèche simulée et mesurée pour ces trois cas. Les résultats montrent une bonne cohérence pour la configuration *contrôle*, avec une faible différence entre modélisation et expérience. Pour les configurations ombragées, la biomasse mesurée est supérieure de 21 % et 10,2 % respectivement en *ombrage moyen* et *fort* par rapport aux valeurs simulées. Ces écarts peuvent s'expliquer par l'absence de certains effets microclimatiques dans le modèle, notamment les couplages thermiques locaux ou l'effet du couvert végétal sur le bilan radiatif (prise en compte de la variation de l'albédo). De plus, les modalités expérimentales, telles que la densité de semis ou l'hétérogénéité de l'humidité du sol, peuvent introduire des variations que le modèle ne capture pas pleinement.

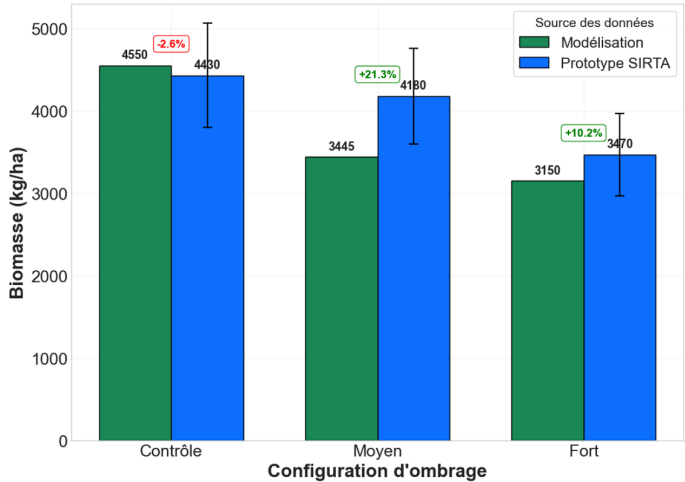


FIG. 3. Comparaison de la biomasse sèche (kg/ha) simulée et mesurée selon l'intensité d'ombrage (SIRTÀ)

5. OPTIMISATION STATIQUE HORAIRE DE L'ORIENTATION DES PANNEAUX

Afin d'évaluer les marges de manœuvre offertes par la configuration des panneaux photovoltaïques dans un système agrivoltaïque, une première phase d'optimisation a été menée sur l'angle d'inclinaison pour des modules à inclinaison fixe. L'objectif est de maximiser la biomasse accumulée sur une période de 90 jours (du 1^{er} avril au 30 juin), en utilisant le modèle couplé présenté précédemment.

Sur cette période, les conditions climatiques moyennes observées sont une température ambiante de 21,7 °C et une irradiance globale moyenne de 253 W/m². La fonction objectif $B(\theta_0, 90)$ représente la biomasse totale simulée en fonction de l'angle d'inclinaison fixe θ_0 des panneaux solaires durant toute la période.

Le problème d'optimisation s'écrit alors :

$$\max_{\theta_0 \in [-90, 90]} B(\theta_0, 90) \quad (1)$$

L'optimisation est conduite à l'aide d'un algorithme d'évolution différentielle (variant best/1/bin), couramment utilisé pour les problèmes non linéaires sans gradient. Les simulations indiquent que la valeur optimale de l'inclinaison est $\theta_0 = 90^\circ$, soit une disposition verticale des panneaux. Ce résultat s'interprète par le fait qu'une orientation verticale réduit significativement l'ombrage au moment du zénith, maximisant ainsi l'exposition lumineuse des cultures durant les heures à fort éclairement.

Ce résultat servira de référence dans les sections suivantes, notamment pour les comparaisons avec des systèmes à inclinaison variable ou orientable.

6. OPTIMISATION DYNAMIQUE HORAIRE DE L'ORIENTATION DES PANNEAUX

Dans cette seconde phase d'analyse, nous considérons un système agrivoltaïque dans lequel l'orientation des panneaux photovoltaïques peut être ajustée dynamiquement à chaque pas de temps horaire, sur une période de 90 jours (du 1^{er} avril au 30 juin). L'objectif est de maximiser la production de biomasse agricole en autorisant un angle d'orientation libre par heure d'ensoleillement. La température moyenne sur la période est de 21,7 °C et l'irradiance globale moyenne est de 253 W/m².

Ce problème principal d'optimisation dynamique introduit $90 \times 24 = 2160$ variables de décision, soit une complexité computationnelle significative. Afin de rendre cette optimisation tractable, nous avons adopté une stratégie de décomposition horaire : chaque pas de temps est traité comme un sous-problème secondaire indépendant d'optimisation mono-variable. La validité de cette décomposition reste à vérifier, mais la connaissance que nous avons de nos modèles de simulation nous permet d'émettre, dans un premier temps, l'hypothèse selon laquelle la solution optimale du problème principal correspond à la composition des solutions optimales des problèmes secondaires. Par ailleurs, les heures nocturnes sont exclues du domaine de décision et fixées à une inclinaison horizontale ($\theta = 0^\circ$) afin de réduire l'espace de recherche sans perte d'efficacité, les entrées radiatives étant nulles durant ces périodes.

Formellement, cette optimisation s'écrit :

$$\forall h_i \in [1, 2160], \quad \theta_i^* = \begin{cases} 0 & \text{si Nuit}(h_i, \text{date}) \\ \arg \max_{\theta_i \in [-90, 90]} B(\theta_i, h_i) & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

où θ_i^* désigne l'angle d'orientation optimal du panneau à l'heure h_i , et $B(\theta_i, h_i)$ la biomasse simulée durant cette heure, fonction de l'angle choisi. et $\text{Nuit}(h_i, \text{date})$ est un prédicat qui est vrai si l'heure indiquée pour cette date est pendant la nuit.

La Figure 4 présente l'orientation optimale moyenne horaire des panneaux sur la période étudiée, ainsi que l'écart type associé, illustrant la variabilité intra-journalière de la stratégie optimale.

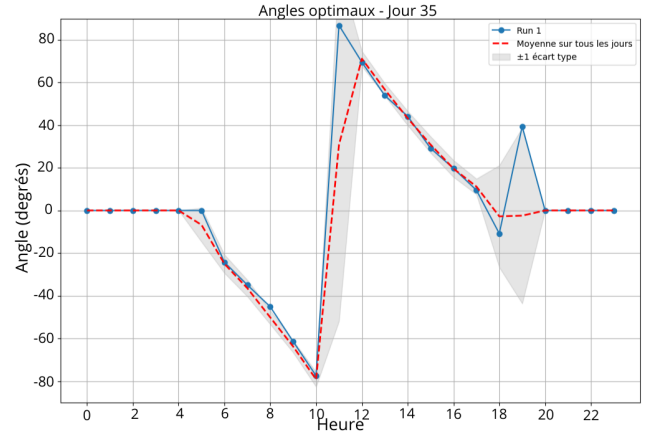


FIG. 4. Orientation optimale des panneaux solaires (°) heure par heure sur 90 jours. L'écart type représente la dispersion des angles sur la période.

L'évolution de la production de biomasse hors racines est comparée à celle obtenue pour d'autres configurations (panneaux fixes à 45° et 90°, tracking solaire, sans panneaux) dans la Figure 5. Les résultats montrent que l'optimisation dynamique permet de se rapprocher des performances de la configuration sans panneaux, tout en conservant une structure AV. Il est toutefois remarquable que la commande optimale identifiée pour maximiser la biomasse adopte une logique d'anti-tracking, c'est-à-dire une orientation opposée à celle du suivi solaire conventionnel ce qui engendre une chute significative de la production électrique comme indiqué sur la Figure 6.

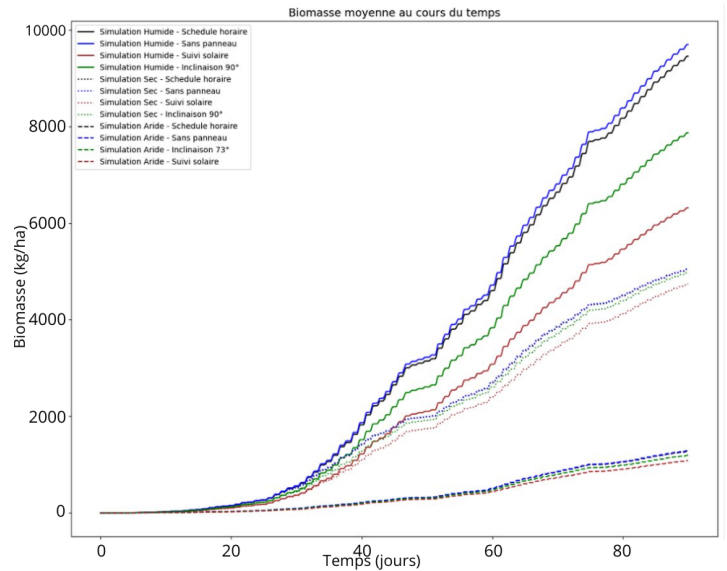


FIG. 5. Comparaison de la production de biomasse hors racines (kg/ha) sur 90 jours pour 5 configurations, dans plusieurs climats hydriques.

Du point de vue énergétique, la Figure 6 montre la puissance moyenne et instantanée produite pour quatre configurations. Le cas à orientation dynamique reste significativement moins performant que le tracking solaire, avec une réduction moyenne de la production électrique de 75 %.

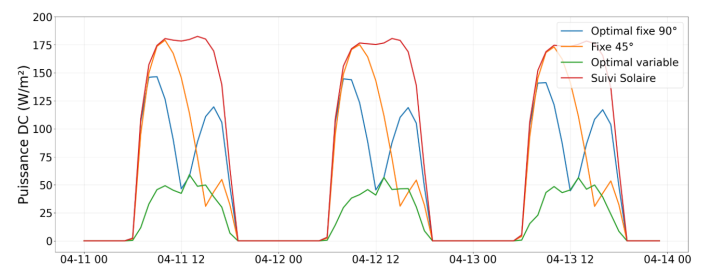


FIG. 6. Évolution de la puissance instantanée (W/m²) sur 3 jours, pour quatre configurations.

Afin d'évaluer la robustesse des stratégies d'orientation, l'analyse a été répliquée sur deux climats contraints : un climat sec (-80% précipitations) et un climat aride (-80% précipitations, -20% eau disponible). Les résultats de production de biomasse sont synthétisés dans les Figures 7 et 8.

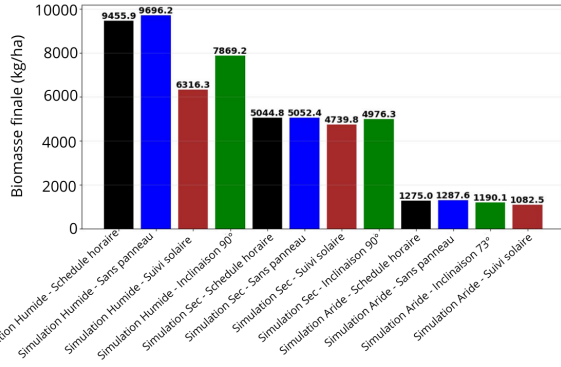


FIG. 7. Biomasse finale hors racines (kg/m²) sur 90 jours pour 5 configurations et 3 climats.

Sur le climat humide de référence, une baisse de biomasse de 35 % est observée entre la configuration sans panneau et le suivi solaire, et de 3 % seulement avec le cas optimal dynamique. Cette tendance se confirme dans les autres climats. Du point de vue énergétique, l'orientation dynamique reste sous-performante pour la production énergétique comparée au tracking, mais représente un compromis intéressant.

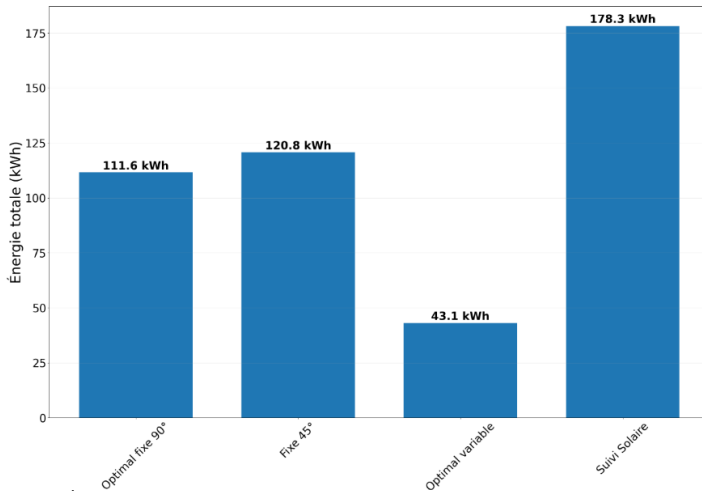


FIG. 8. Énergie totale produite (kWh) sur 90 jours pour quatre configurations. Les résultats correspondent à un panneau de $200W_c$ et de $1m^2$.

Conclusion partielle : ces résultats indiquent que, dans les conditions climatiques simulées, l'intégration de panneaux photovoltaïques à orientation dynamique peut atténuer l'impact agronomique de l'ombrage tout en améliorant la production d'énergie. Toutefois, ce compromis n'atteint pas les performances agricoles de la configuration sans panneaux et requiert une étude approfondie en co-optimisation multi-objectif pour identifier les configurations véritablement équilibrées entre rendements agricoles et énergétiques.

7. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF APPLIQUÉE À L'INSTALLATION SIMULÉE DU SIRTÀ

Dans un deuxième temps, le modèle est appliqué aux configurations d'optimisation décrites dans les parties précédentes et pour les valeurs de climats du SIRTÀ. Les résultats de biomasse obtenus sont présents en figure 9. Les résultats de production de production électriques sont présents en figure 10. On retrouve des niveaux de biomasse finale et de production électrique caractéristiques d'un climat favorable, qui comme dans les parties précédentes avantage principalement la configuration sans panneaux.

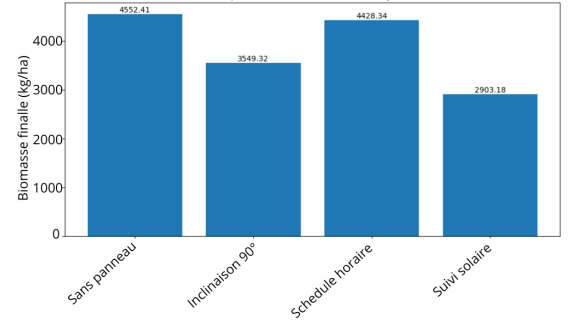


FIG. 9. Comparaison de la production de biomasse finale (kg/ha) selon les configurations : sans panneau, Optimal fixe 90°, Optimal variable et suivi solaire

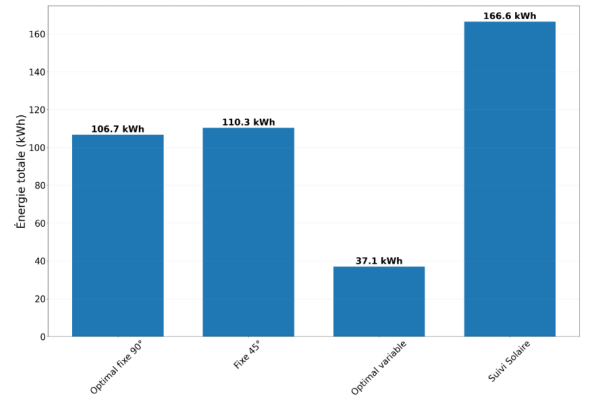


FIG. 10. Énergie électrique totale produite (kWh) sur 76 jours pour 4 configurations de panneaux : optimal fixe 90 deg, fixe 45 deg, optimal variable et suivi solaire. Les résultats correspondent à un panneau de $200W_c$ et de $1m^2$.

Une dernière configuration d'optimisation du modèle, multi-objectif, est étudiée sur la base des données climatiques issues du prototype du SIRTÀ. Cette optimisation multi-objectif vise à maximiser la production de biomasse tout en garantissant un niveau minimal de production électrique. Cette approche utilise la méthode ε -contrainte où l'objectif principal (biomasse) est optimisé sous contrainte que l'objectif secondaire (électricité) maintienne un niveau acceptable.

Formellement, le problème s'écrit :

$$\theta_\varepsilon = (\theta_i^*)_{i=1}^{2160} \quad (3)$$

avec, $\forall i \in \{1, \dots, 2160\}$:

$$\theta_i^* = \begin{cases} 0 & \text{si Nuit}(h_i, \text{date}) \\ \arg \max_{\theta_i \in [-90^\circ, 90^\circ]} B(\theta_i, h_i) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{s.c.} \quad E(\theta_i, h_i) \geq \varepsilon \cdot E_{\max, i} \quad (5)$$

où :

- $B(\theta_i, h_i)$ représente la production de biomasse (kg/ha) en fonction de l'orientation θ_i des panneaux à l'heure h_i
- $E(\theta_i, h_i)$ représente la production électrique (kWh) en fonction de θ_i à l'heure h_i
- $E_{\max, i}$ est la production électrique maximale possible à l'heure h_i (obtenue avec du backtracking)
- $\varepsilon \in [0, 1]$ est le coefficient de contrainte représentant le pourcentage minimal de production électrique à maintenir

Cette formulation nous permet de générer la frontière de Pareto du problème en faisant varier ε de 0 à 1. Lorsque $\varepsilon = 0$, nous obtenons la solution qui maximise uniquement la biomasse (anti-tracking), lorsque $\varepsilon = 1$, nous nous rapprochons de la solution qui maximise uniquement l'électricité (backtracking).

Cette méthode nous permet d'analyser les compromis entre production agricole et production énergétique dans notre système agrivoltaïque.

La figure 11 présente les résultats de l'optimisation multi-objectif par ϵ -contrainte du modèle sur forme de front de Pareto pour 10 valeurs de ϵ .

Cette optimisation multi-objectif permet d'observer qu'il est possible de produire biomasse et électricité de manière conjointe, tout en assumant un compromis. Par exemple, il est possible de produire environ 90% de l'électricité maximale en gardant 70% de la production de biomasse. Toutefois, la monotonie du front de Pareto, nous amène à considérer que, pour ces conditions d'exploitation, on ne voit pas apparaître de couplage bénéfique entre les deux exploitations.

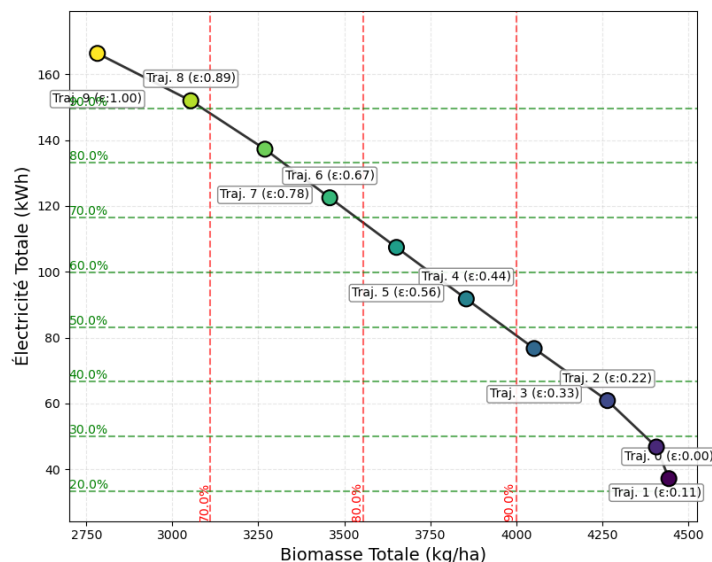


FIG. 11. Front de Pareto pour l'optimisation multi-objectif biomasse-électricité du modèle avec méthode ϵ -contrainte (10 epsilons)

Enfin, afin de prévoir l'impact potentiel des panneaux sur la production de biomasse, une analyse de variation de la température est présent en figure 12. On observe que dans toutes les configurations, lorsque la température augmente, la biomasse augmente et inversement. Le résultat est cohérent en considérant la température moyenne de 19.4°C et la température optimale de pousse de la luzerne fixée à 25°C ici. Ceci laisse imaginer qu'en cas de refroidissement de la température de l'air dû à la présence des panneaux à proximité des plantes, cela impacterait très négativement la biomasse. Par exemple, pour 2°C de moins, il y aurait une baisse de près de 10% de la biomasse finale. Inversement, en cas de fortes chaleurs l'impact du système photovoltaïque pourra être bénéfique.

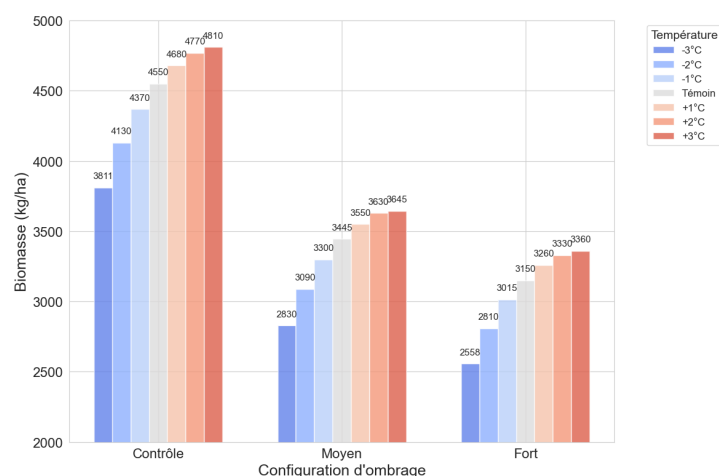


FIG. 12. Influence de la température sur la production de biomasse finale sur la période selon différentes configurations d'ombrage

8. CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cette étude permettent une première évaluation de la faisabilité des systèmes agrivoltaïques dans un contexte tempéré, tel que simulé à partir des données expérimentales du SIRT. Nos simulations suggèrent que, dans ces conditions, la présence de panneaux photovoltaïques tend à réduire la production agricole, principalement en raison de l'effet d'ombrage. En l'absence de stress hydrique ou thermique marqué, cet ombrage constitue la principale influence des panneaux sur le microclimat des cultures, avec un effet globalement défavorable. Cette conclusion est renforcée par les résultats de [4], ainsi que par notre analyse de sensibilité à la température, qui montre une diminution significative de la biomasse en cas de refroidissement induit.

Ces éléments conduisent à penser que, dans des climats tempérés non contraints, ce type d'installation est peu adapté du point de vue agronomique. De plus, toute tentative d'optimisation de la croissance végétale par ajustement angulaire des panneaux conduit à une réduction substantielle de la production électrique, pouvant compromettre la viabilité énergétique du système.

Toutefois, ces conclusions restent à nuancer. Des discussions au sein du consortium ont mis en évidence que les performances relatives des installations agrivoltaïques peuvent s'améliorer significativement dans des contextes où les cultures sont soumises à un stress climatique plus intense. Dans ces conditions, l'ombrage apporté par les panneaux pourrait contribuer à limiter les pertes extrêmes, justifiant l'adoption d'une logique de résilience plutôt que de maximisation instantanée du rendement.

Enfin, il convient de souligner que le modèle utilisé dans cette étude n'intègre pas encore certains effets déterminants, tels que la gestion dynamique de l'irrigation ou les interactions thermiques complètes entre le couvert végétal et les structures photovoltaïques. De plus, le modèle de biomasse linéaire en fonction de l'irradiance reçue par le couvert utilisé ici semble être un point critique. En effet, il ne capture pas certains effets non-linéaires comme la saturation lumineuse. Ces aspects feront l'objet de travaux futurs, afin de mieux cerner les situations dans lesquelles l'agrivoltaïsme peut constituer une stratégie vertueuse de co-utilisation des terres.

REMERCIEMENTS



Ce travail a bénéficié d'un soutien de l'État, géré par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030, portant la référence **ANR-22-PETA-0007**.

L'auteur remercie les membres du consortium AgriPV-ER pour les échanges scientifiques et les retours techniques constructifs.

Une première version de ce manuscrit a été rédigée par les auteurs, puis reformulée à l'aide d'un modèle de langage fondé sur l'intelligence artificielle, dans le respect des règles de confidentialité, d'éthique et de propriété intellectuelle. L'auteur conserve l'entière responsabilité du contenu scientifique, des données présentées et des conclusions de l'article.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Article L314-36 - Code de l'énergie, Légifrance. [En ligne]. Disponible à : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000047298015. [Consulté le : 31 mars 2025].
- [2] M. A. Al Mamun, P. Dargusch, D. Wadley, N. A. Zulkarnain, et A. A. Aziz, "A Review of Research on Agrivoltaic Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112351, 17 mars 2022.
- [3] G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, et al., *Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands*, *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 848–855, 2019. DOI : [10.1038/s41893-019-0364-5](https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5).
- [4] L. Madej, C. Picon-Cochard, C. Bouhier de L'Ecluse, C. Cogny, L. Michaud, et al., "One Year of Grassland Vegetation Dynamics in Two Sheep-Grazed Agrivoltaic Systems," *AgriVoltaics World Conference 2022*, juin 2022, Piacenza, Italie. <https://doi.org/10.52825/agripv.vli.692>. HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03728200>.
- [5] ADEME, *Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme – Guide de classification des projets et définition de l'agrivoltaïsme*, 2023.
- [6] A. Duwicquet, *Suivi agronomique d'un couvert de luzerne sous démonstrateur agrivoltaïque*, Mémoire de fin d'études, École Supérieure d'Agriculture d'Angers, Angers, France, nov. 2024.
- [7] P. Juillion, G. Lopez, G. Verambre, M. Génard, V. Lesniak, et al., "Specific Leaf Area and Photosynthesis of Apple Trees Under a Dynamic Agrivoltaic System," *4th AgriVoltaics World Conference*, AgriVoltaics Conference Proceedings, vol. 2, 2024. <https://doi.org/10.52825/agripv.v2i.999>. HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04765035>.
- [8] F. Abidi, *Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson*, Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2013. <https://theses.hal.science/tel-00871779>.
- [9] N. U. F. Niangoran, D. Buso, L. Canale, G. Zissis, "Éclairage horticole : pourquoi choisir la technologie LED ?", *La Revue de l'électricité et de l'électronique*, vol. 2020, no. 1, pp. 62–68, 2020. HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02518191>.
- [10] S. Chen, X. Mao, D. A. Barry, et J. Yang, "Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil," *Agricultural Water Management*, vol. 221, pp. 160–174, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.031>. [Consulté le : 15 janv. 2025].
- [11] W. Holmgren, C. Hansen, et M. Mikofski, "pvlib python : a Python package for modeling solar energy systems," *Journal of Open Source Software*, vol. 3, no. 29, p. 884, 2018. DOI : [10.21105/joss.00884](https://doi.org/10.21105/joss.00884).
- [12] A. P. Dobos, "PVWatts Version 5 Manual," 2014. [En ligne]. Disponible à : <http://pvwatts.nrel.gov/downloads/pvwattsv5.pdf>.
- [13] R. Noland, M. S. Wells, J. A. Coulter, T. Tiede, J. M. Baker, K. L. Martinson, et C. C. Sheaffer, "Estimating alfalfa yield and nutritive value with remote sensing and environmental factors," *Field Crops Research*, vol. 222, pp. 189–196, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.017>.
- [14] V. Heuzé et al., "Alfalfa (*Medicago sativa*)," Feedipedia, INRAE, CIRAD, AFZ and FAO, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.feedipedia.org/node/275>.
- [15] N. Dincă et D. Dunea, "On the Assessment of Light Use Efficiency in Alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the Eco-Climatic Conditions of Târgoviște Piedmont Plain," *Romanian Agricultural Research*, vol. 35, pp. 60–66, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.incda-fundulea.ro/rar/nr35/rar35.9.pdf>.
- [16] Agri-Réseau, "Profil de sol," 2011. [En ligne]. Disponible : https://www.agrireseau.net/documents/Document_101213.pdf.