
Agrivoltaïsme : Etude de l'effet des panneaux photovoltaïques bifaciaux sur le cycle cultural de légumes sur la parcelle agroforestière de wasabi

Auteur : Nikiema, Pingdwendé Madina Emeline

Promoteur(s) : Jijakli, Haissam

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master de spécialisation en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18281>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**AGRIVOLTAÏSME : ETUDE DE L'EFFET DES PANNEAUX
PHOTOVOLTAÏQUES BIFACIAUX SUR LE CYCLE CULTURAL DE LÉGUMES
SUR LA PARCELLE AGROFORESTIÈRE DE WASABI.**

PINGWENDE MADINA EMELINE NIKIEMA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET PRESERVATION DES
RESSOURCES NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : PROF. HAISSAM JIJAKLI

ENCADRANT : ARTHUR LIBAULT

Copyright : Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique (*) de Gembloux Agro-Bio Tech.

(*) Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**AGRIVOLTAÏSME : ETUDE DE L'EFFET DES PANNEAUX
PHOTOVOLTAÏQUES BIFACIAUX SUR LE CYCLE CULTURAL DE LÉGUMES
SUR LA PARCELLE AGROFORESTIÈRE DE WASABI.**

PINGWENDE MADINA EMELINE NIKIEMA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET PRESERVATION DES
RESSOURCES NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

PROMOTEUR : PROF. HAISSAM JIJAKLI

ENCADRANT : ARTHUR LIBAULT

DEDICACES

Je dédie ce travail

À Allah,

Créateur du souffle de vie, je lui rends grâce pour les bienfaits qu'il accomplit dans ma vie.

À mon défunt père,

Abdoulaye Sosso NIKIEMA

À ma mère, mes sœurs et mon frère,

Vous êtes mon socle et une source d'inspiration constante pour moi.

REMERCIEMENTS

En préambule de ce travail, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie très particulièrement mon promoteur, le professeur Haissam Jijakli de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail au sein du laboratoire de phytopathologie et pour sa supervision tout au long de celui-ci.

Je remercie chaleureusement mon encadrant Arthur Libault pour son appui et ses conseils. Il a été d'une aide remarquable pour l'aboutissement de ce travail. La qualité de son encadrement et sa disponibilité m'ont permis de progresser dans mes recherches.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du laboratoire ainsi que mes collègues stagiaires qui ont fait preuve d'amabilité et de convivialité tout au long de cette période.

Un merci particulier à Hadrien, le maraicher en charge de la plateforme wasabi, pour son aide inestimable tout au long de la culture des légumes.

Je tiens à remercier Jimmy pour la mise à disposition des matériels de mesures qui ont été d'une grande utilité.

J'adresse un merci chaleureux à mes amis, particulièrement à Faye Ramatoulaye, pour leur aide et encouragements. Sans vous le chemin n'aurait pas été aussi agréable.

Sur le plan personnel, je tiens à remercier ma mère pour son soutien indéfectible. Merci à mes sœurs et mon frère, pour l'intérêt toujours manifesté à mes études, leurs écoutes et pour la motivation qu'ils m'ont toujours transmise durant mes périodes de doutes.

Et à toi Razak, j'adresse un merci chaleureux pour ton accompagnement indéfectible et tout l'amour que tu m'apportes.

Je ne saurai finir sans exprimer ma profonde reconnaissance envers Jean-Noël, Adriaan, Awa et Sara qui ont consacré de leur temps pour la relecture de ce travail.

RESUME

L'agrivoltaïsme renvoie à la double utilisation d'une même surface terrestre pour produire de la nourriture et l'énergie photovoltaïque. Ce concept encore peu développé présente cependant plusieurs avantages. Les panneaux offrent une protection des plantes contre les conditions climatiques extrêmes et permettent d'optimiser l'utilisation de l'eau. Nous avons étudié dans ce sens le dispositif mis en place sur la plateforme agroforestière de WASABI, afin d'appréhender l'impact des panneaux photovoltaïques sur la croissance de légumes en culture maraichère. Trois légumes (laitues, haricots verts et courgettes) ont été étudiés. Les laitues et les haricots étaient repartis en 4 bandes (Ouest, mi-Ouest, mi-Est et Est) distante des 2,5 m l'une de l'autre de chaque côté des panneaux. Les courgettes étaient cultivées au centre des structures de panneaux solaires. Pour réaliser l'expérience, quatre modalités dont 3 (horizontale, modulable et verticale) étaient constituées chacune de 2 structures de PV bifaciaux, et une (le témoin) constitué de 2 structures non équipées de panneaux ont été testées en association avec les bandes. L'effet de l'ombre sur les rendements a été étudié sur la parcelle. Les meilleurs rendements de laitues et haricots ont été observés sur la modalité verticale pour les bandes Ouest et mi-Ouest. Les rendements de laitues sur cette modalité sont respectivement de 31% et 8,8% plus élevés par rapport à la modalité témoin pour les mêmes bandes. C'est sur la bande mi-Est que nous avons le moins de variation entre les rendements de nos 4 modalités. Le rendement de l'horizontale est plus élevé de 1,83% du témoin. Et par rapport aux modalités verticale et modulable le témoin est plus élevé de respectivement 8,51 et 12,27%. Pour les courgettes, le meilleur rendement a été observé sur les modalités verticale et témoin. Les rendements sur la verticale sont respectivement 51,20 et 52,66 % plus élevés par rapport aux modalités horizontale et modulable. Ces différents résultats ont permis de constater que les facteurs tel que l'ombre, le tassement du sol ont un impact sur la productivité des plantes. Il ressort du bilan économique réalisé la nécessité de réduire les dépenses d'exploitations, principalement ceux lié au temps mis pour la récolte. Il se révèle aussi important d'aller plus en profondeur dans l'étude de ce bilan avec les informations essentielles, afin de pouvoir appréhender la rentabilité de ce système agrivoltaïque.

Mots clés : Agrivoltaïsme, Bandes, Modalités, Ombre, Laitue, Haricot vert, Courgette

ABSTRACT

Agrivoltaics refers to the dual use of the same land surface to produce food and photovoltaic energy. It is still relatively undeveloped but offers several advantages. The panels protect plants from extreme weather conditions and optimize water use. In this work, we studied the system set up on the WASABI agroforestry platform, to assess the impact of photovoltaic panels on the growth of vegetables in market gardening. Three vegetables (lettuces, green beans, and zucchinis) were studied. Lettuce and beans were planted in 4 bands (west, mid-west, mid-east and east) 2.5 m from each other. Zucchini were grown in the center of the solar panel structures. To carry out the experiment, 4 modalities were tested in association with the strips, 3 of which (horizontal, modular, and vertical) each consisting of 2 bifacial PV structures, and one (the control) consisted of 2 structures without panels. The effect of shade on yields was studied on the plot. The best lettuce and bean yields were observed on the vertical modality for the West and mid-West bands. Lettuce yields on this modality were respectively 31% and 8.8% higher than the control for the same bands. It's on the mid-East strip that we have the least variation between the yields of our 4 modalities. The horizontal yield is 1.83% higher than the control. And compared with the vertical and modulable modalities, the control is higher by 8.51 and 12.27% respectively. For zucchinis, the best yields were observed on the vertical and control modalities. Vertical yields were 51.20 and 52.66% higher than horizontal and modulable yields respectively. These results show that factors such as shade and soil compaction have an impact on plant productivity. The economic results show the need to reduce operating costs, especially those linked to harvesting time. It is also important to take a closer look at studying this balance sheet with the essential information, to assess the return on investment of this agrivoltaic system.

Key words : Agrivoltaics, Bands, Modalities, Shade, Lettuce, Green beans, Zucchini

TABLES DES MATIÈRES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
TABLES DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTES DES TABLEAUX	ix
LISTES DES ANNEXES	ix
LISTES DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	x
LEXIQUE	xi
INTRODUCTION	1
I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	4
II. L'AGRIVOLTAÏSME	6
II.1 Revue bibliographique.....	6
II.1.1 Définition(s) de l'agrivoltaïsme	6
II.1.2 Les différents systèmes agrivoltaïques.....	7
II.2 Choix des légumes pour l'expérimentation	16
II.3 Ravageurs et maladies végétales fréquents chez les légumes étudiés	18
III. MATÉRIELS ET MÉTHODES	19
III.1 Informations pratique sur l'expérimentation	19
III.1.1 Choix des variétés de légumes	19
III.1.2 Dispositif expérimental	19
III.1.3 Les semis	21
III.1.4 Système d'irrigation des cultures	22
III.2 Paramètres observés et mesurés	22

III.2.1	Mesure de l'intensité lumineuse.....	22
III.2.2	Paramètres de la culture	23
III.2.3	Consommation en eau des cultures via le système d'irrigation et apport par l'eau de pluie	24
III.3	Analyse des résultats	24
IV.	RÉSULTATS	25
IV.1	Résultats des mesures du PAR-mètre.....	25
IV.2	Résultats sur l'état des chlorophylles	27
IV.3	Données de récoltes des laitues	28
IV.3.1	Biomasse fraîche	28
IV.3.2	Biomasse sèche	31
IV.3.3	Résultats des nombres de feuilles.....	33
IV.4	Données de récoltes des haricots verts	34
IV.5	Données de récoltes des courgettes	35
IV.6	Quantification de la consommation en eau.....	36
IV.7	Risques biologiques rencontrées	38
V.	BILAN ÉCONOMIQUE DES RÉCOLTES	39
VI.	DISCUSSION	41
VI.1	Effets sur les paramètres étudiés des laitues.....	41
VI.2	Effets sur les cultures de haricots et courgettes	42
VII.	RECOMMANDATIONS	43
	CONCLUSION	45
	ANNEXES	46
	BIBLIOGRAPHIES	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Trois types différents de système agrivoltaïque : (a) utilisant l'espace entre les panneaux photovoltaïques (PV) pour les cultures, (b) une serre photovoltaïque et (c) un système sur pilotis (Sekiyama & Nagashima, 2019)-----	7
Figure 2 : Ombrières mobiles surélevées sur culture de vigne (à gauche) et sur culture de blé et laitue (à droite) en France (https://sunagri.fr/resultats-viticulture/ et (Marrou, 2019))-----	11
Figure 3 : Centrale au sol avec des modules bifaciaux montés à la verticale associée à la pâture d'une prairie sur le site de Donaueschingen (à gauche), et servant de clôture pour des vaches (à droite) https://next2sun.com/en/ -----	12
Figure 4 : Projet expérimentale de panneaux solaires à modules de feuilles transparentes et des cellules classiques de silicium au-dessus d'un verger de poiriers à Bierbeek,Belgique (à gauche), et de système bifacial vertical et tracker à axe unique sur le site de Grimbergen ----	12
Figure 5 : Ensemble de serre photovoltaïque en Sardaigne, Italie (Tagliaferri, s. d) -----	13
Figure 6 : Exemples d'ombrières PV au Japon (culture de riz paddy à gauche et de thé à droite) https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/einou.html -----	13
Figure 7 : Installation d'un projet agrivoltaïque de 200 mégawatts (MW), situé sur des terres dégradées associés avec la culture d'espèces tolérantes à l'ombre (bletilla, le paeonia, le framboisier, etc.) à Jiangshan, en chine (Xiao et al., 2022) -----	13
Figure 8 : Projet pilote de serre photovoltaïque de crevettes à Bac Lieu (à gauche) et de centrale photovoltaïque installée au-dessus d'un bassin d'eau contenant des Pangasius à An Giang, au Vietnam (à droite) (Fraunhofer ISE, 2019) -----	14
Figure 9 : Centrale au sol avec panneaux bifaciaux sur cultures de plantes à gauche et panneaux monofaciaux à droite sur cultures de Tomates au Colorado (US) https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/agrivoltaics.html -----	14
Figure 10 : Photo de la parcelle d'expérimentation (crédit: Arthur Libault) -----	20
Figure 11 : Photo de la disposition des cultures sur la parcelle (crédit : Nikiema Madina)---	21
Figure 12 : Schéma des points précis mesurés avec le PAR-mètre (modèle pour la modalité horizontale)-----	22
Figure 13 : Valeurs du PAR-mètre relevés pour chaque bande par modalité-----	26
Figure 14 : Photos présentant la position de l'ombre à différentes heures de la journée -----	27
Figure 15 : Box-plots général des données de biomasse fraîche des laitues par bande avec sous-catégorie les modalités -----	28

Figure 16 : Box-plots des données de masse fraîche des laitues par bande avec sous-catégorie les modalités-----	30
Figure 17 : Box-plots des données de masse sèche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bande -----	32
Figure 18 : Box-plots des données sur le nombre de feuilles de chaque bande pour les 4 modalités-----	33
Figure 19 : Masse par plant de haricot de chaque bande pour les 4 modalités-----	34
Figure 20 : Masse des courgettes sur chaque modalité -----	35
Figure 21 : Evolution du nombre de feuilles de courgettes pour les 4 modalités-----	36
Figure 22 : Apport en eau de puit et des précipitations aux plants de laitues -----	37
Figure 23 : Apport en eau de puit et des précipitations aux plants de haricots -----	37
Figure 24 : Carence observée sur les feuilles de haricot (à gauche) et feuille de courgette atteint d'oïdium (à droite) -----	38
Figure 25 : Temps total de travail technicien par tâche -----	39

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Type de couplage entre centrales photovoltaïques au sol et production agricole (ADEME et al., 2021a) -----	8
Tableau 2 : Type de couplage entre serres photovoltaïques et production agricole-----	9
Tableau 3 : Type de couplage entre ombrières photovoltaïques fixes et production agricole (ADEME et al., 2021a) -----	9
Tableau 4 : Type de couplage entre ombrières photovoltaïques mobiles et production agricole (ADEME et al., 2021a) -----	10
Tableau 5 : Différentes cultures et animaux rencontrés en agrivoltaïsme -----	15
Tableau 6 : Maladies et ravageurs des légumes, (Suamme, 2012.); (Mappa, 2010) -----	18
Tableau 7 : Paramètres étudiés pour la culture de haricot et courgette -----	23
Tableau 8 : Paramètres étudiés pour la laitue-----	23
Tableau 9 : Bilan des coûts entrées et sorties-----	40

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des semis et transplantation	46
Annexe 2 : Box-plots général des données de biomasse fraîche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bandes et des données sur les nombres de feuilles de laitues de chaque bande pour les 4 modalités.....	47
Annexe 3 : Box-plots des données de masse fraîche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bandes	48
Annexe 4 : Points de saturation lumineuse de quelques cultures(Sekiyama & Nagashima, 2019)	49
Annexe 5 : Prix moyen d'un kilogramme de légumes en agriculture conventionnelle et biologique (prix/pièce pour la laitue et le concombre)(<i>Observatoire Fruits et Légumes 2022.pdf</i> , s. d.).....	49
Annexe 6 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques	50

LISTES DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

°C : degré Celsius

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AV : Agrivoltaïque

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques

cm : Centimètre

m³ : mètres cube

COP : Conférences des parties

Hor : Horizontal

INERA : Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles

Kg : Kilogrammes

l : litres

m : mètres

Mod : Modulable

Tem : Témoin

UE : Union européenne

Ver : Verticale

WASABI : plateforme Wallonne de Systèmes innovants en Agriculture et Biodiversité urbaine

LEXIQUE

Termes	Définitions
Agrivoltaïsme	Production d'énergie photovoltaïques et production agricole sur une même parcelle.
Élevage en stabulation	Le bétail est maintenu saisonnièrement ou en permanence dans un espace restreint et clos ou ouvert (Sidibé., S et al,2012).
Panneaux tubulaires	Panneaux moins sensibles aux ombrages qui fonctionnent mieux par rayonnement diffus.

INTRODUCTION

Maintenir la température de la planète en dessous de 2°C par rapport au niveau préindustriels est l'objectif fixé lors de la conférence des parties 21 (COP21) tenue à Paris en 2015 (CCNUCC, 2015). L'intérêt pour les ressources énergétiques renouvelables a commencé à prendre de l'ampleur ces dernières années car elles présentent l'avantage de participer à réduire l'utilisation des combustibles fossiles et atténuer le réchauffement climatique. La production d'énergie photovoltaïque est l'une de ces ressources renouvelables. Ces dernières décennies, grâce au progrès significatifs réalisés, elle a connu une grande expansion et son utilisation continue de prendre de l'ampleur à travers le monde. Selon l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), pour atteindre le scénario « zéro émission nette » d'ici 2050, une augmentation de la production annuelle de 25% d'énergie verte sur la période de 2022-2030 est nécessaire (AIE, 2022). Afin de répondre à cette prédication, de grandes surfaces pour l'installation des parcs solaires sont nécessaires. Cependant, il est reconnu aujourd'hui que la conversion des terres, et l'utilisation intensive des terres agricoles pour répondre à la demande alimentaire croissante contribuent également à 24% des émissions de GES alimentaire dans le monde (Hannah Ritchie, 2019). En sus de cela, la demande croissante en denrées alimentaires associée à cette demande croissante en énergie crée une concurrence pour les ressources foncières (Harvey & Pilgrim, 2011), (Nonhebel, 2005) pourtant limitées. De ce fait, pour répondre à ce que Tilman et al., (2009) appellent le « trilemme énergétique, alimentaire et environnemental », il est essentiel de le faire de manière durable pour limiter le changement climatique tout en nourrissant les 9 à 10 milliards de personnes attendus pour 2050 (Harvey & Pilgrim, 2011). Dès lors, l'agrivoltaïsme apparaît comme une solution originale et innovante pour le monde (Harinarayana & Vasavi, 2014). Ce concept pensé d'abord par Goetzberger et Zastrow (1982), et défini par Dupraz et al., (2011) consiste en la double utilisation d'une même surface terrestre pour produire de la nourriture et l'énergie photovoltaïque. Cette double utilisation donne l'avantage aux systèmes agrivoltaïques de permettre d'atténuer le stress lié à la recherche de nouvelles terres pour l'installation de panneaux photovoltaïques. En sus de cela, ils peuvent contribuer à la protection des plantes contre les conditions climatiques extrêmes (Barron-Gafford et al., 2019) et améliorer la disponibilité en eau (Elamri et al., 2018). Des études antérieures ont montrées que les systèmes agrivoltaïques permettent d'avoir une production énergétique ainsi qu'une production agricole (plus encore pour les cultures tolérantes à l'ombre) optimale sur une même surface (Harinarayana & Vasavi, 2014) ; (Marrou et al., 2013a).

Toutefois, ce type de systèmes présente aussi des désavantages, entre autres une augmentation de la pression foncière. En effet, l'énergie photovoltaïque apporte un revenu supplémentaire à la terre qui pourrait inciter les gens à faire des spéculations et entraîner dès lors une augmentation de la valeur des terres. Les fermes solaires peuvent également avoir un impact sur l'humain et l'environnement à court et long terme (Weselek et al., 2019). Notamment les risques d'incendie, l'impact visuel, perturbation de l'équilibre écologique et le traitement des déchets qui seront générés par les modules photovoltaïques en fin de vie. En effet, lors de l'élimination de ces déchets s'ils ne sont manipulés correctement ils peuvent être une menace pour la santé publique (Aman et al., 2015).

L'influence des panneaux photovoltaïques (PV) sur les cultures varie en fonction de la culture et de la disposition des PV. Marrou et al., (2013a) ont constaté que le rendement de laitue diminuait à mesure que la quantité d'ombre diminuait. Les rendements du riz ont diminué de 20% alors que l'ombre augmentait de 20% (Ai et Keiichi 2018).

Divers articles récents se sont concentrés plus sur l'effet de l'ombre des PV sur les cultures avec des systèmes photovoltaïques placés entre 2 et 5 m au-dessus du sol, et des centrales au sol avec une orientation fixe des panneaux solaires (Patel et al., 2018 ; Marrou et al., 2013b ; Dupraz et al., 2011 ; Elamri et al., 2018) . Ainsi que la répartition de la lumière sous les panneaux solaires en ce qui concerne, les angles d'inclinaison et l'orientation du système (Amaducci et al., 2018 ; Weselek et al., 2019 ; Wang et al., 2017). Ces systèmes ont le plus souvent été étudiés pour différentes cultures principalement tolérantes à l'ombre, tel que la laitue, le concombre et le blé dur pour différentes saisons de cultures (Marrou et al., 2013b). Une étude menée par (Sekiyama & Nagashima, 2019) sur le maïs (culture non tolérante à l'ombre) a permis de montrer tout de même de bons résultats sous des systèmes agrivoltaïques (AV). En effet, elle a montré qu'à partir d'un certain seuil d'exposition (point de saturation) à la lumière du soleil, les plantes développent des mécanismes pour se protéger du soleil. De plus, une fois que ce point est atteint la lumière n'est plus un facteur limitant pour la photosynthèse. Trouver en annexe 4 un tableau reprenant les points de saturation de différentes cultures dont la laitue.

On constate un manque dans la littérature en ce qui concerne les systèmes agrivoltaïques constitués de panneaux bifaciaux modulables. Les rares études qui se sont penchés sur le sujet concernaient les panneaux bifaciaux inclinés fixes (M. Trommsdorff et al.,2021), (M.H. Riaz et al., 2021), (Cho et al., 2020). Cela montre la nécessité de poursuivre les recherches en

explorant les nouvelles technologies émergentes susceptibles de stimuler la production d'énergie, ainsi que leur impact sur une large diversité de cultures.

L'objectif de notre étude est d'examiner l'influence des systèmes agrivoltaïques sur la croissance de légumes en culture maraichère en environnement tempéré. Cette recherche s'est particulièrement portée sur le système avec PV bifaciaux à inclinaison modulable monté au sol. C'est un système encore peu documenté dans les études existantes parce qu'elle fait partie des nouvelles technologies dans le domaine des panneaux photovoltaïques.

Notre étude va évaluer : i) l'effet de l'ombrage des PV sur les cultures, et ii) l'efficacité des PV à protéger les cultures contre les conditions climatiques.

Les effets de l'ombrage de nos PV sont étudiés sur la base d'un certain nombre de paramètres agronomiques tels que la performance des cultures et le rendement. Trois espèces de cultures différentes (Haricot, laitue et courgette) seront étudiées dans le cadre de notre expérimentation. Nous débuterons par la présentation du contexte d'adoption de l'agrivoltaïsme, les enjeux auxquelles il vient répondre et faire face. En sus de cela nous ferons un résumé de la documentation traitant des systèmes agrivoltaïques (AV) et un aperçu des différentes installations existantes dans le monde, ainsi que des cultures les plus utilisées dans ce type de système.

Dans la deuxième partie du travail, nous expliciterons la méthodologie utilisée pour mettre sur pied notre expérimentation. Ensuite nous présenterons les résultats obtenus en fin d'expérience, ainsi qu'une brève présentation du bilan économique évalué.

Pour terminer nous discuterons ces résultats et proposerons quelques recommandations dans le cas où une pareille étude devait être réitérée.

I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans le passé, pour réduire l'utilisation des énergies fossiles, la production de biocarburants avait été introduite, mais le problème de la concurrence foncière entre les secteurs de l'énergie et de l'agriculture s'est rapidement posé menaçant la sécurité alimentaire (Harvey & Pilgrim, 2011). En effet, les agriculteurs de l'UE devaient dorénavant geler une partie de leur superficie agricole totale pour permettre la production de ces biocarburants. (Kuemmel et al., 1998).

De nos jours, avec les avancées technologiques des panneaux photovoltaïques, la division du terrain pour la production énergétique et alimentaire est désormais possible sans accroître la concurrence foncière suivant le modèle de l'agroforesterie (Dinesh & Pearce, 2016). En effet le système agroforestier est le précurseur du système agrivoltaïque, à la différence que le premier consiste à intercaler sur un même terrain les arbres et les cultures au sol (Talbot, 2011), et tandis que le second combine sur une même surface terrestre la production d'énergie photovoltaïque et alimentaire.

Le concept agrivoltaïque a été théorisé par les scientifiques Goetzberger et Zastrow en 1982 qui ont proposés de mettre en valeur l'espace entre les rangées de PV pour les cultures (Dinesh & Pearce, 2016). En 2004, à l'initiative du japonais Akira Nagashima, la première ferme agrivoltaïque du Japon est installée avec un espacement suffisamment large pour laisser passer la lumière (Tajima & Iida, 2021). Ce ne sera qu'en 2011 dans la publication scientifique de Dupraz et al., 2011 que le terme « agrivoltaïsme » est utilisé pour la première fois. Trois décennies après la formulation de l'idée d'une combinaison entre production d'énergie solaire et production agricole, ce concept est utilisé dans divers projets et usines d'expérimentation à travers le monde entier (Weselek et al., 2019). En Belgique, le premier prototype agrivoltaïque a été implanté à Beernem (Willockx et al., 2020).

Les systèmes agrivoltaïques peuvent être une réponse aux enjeux économiques, énergétiques et environnementaux auxquelles fait face notre société.

Entre l'instabilité des marchés internationaux, la hausse des prix de l'énergie et les aléas climatique, le monde agricole rencontre des difficultés économiques (ADEME, 2021a). De ce fait, les agriculteurs sont à la recherche de solutions durables pour pérenniser leurs activités, et l'agrivoltaïsme pourrait apporter ces solutions. Selon Weselek et al., 2019, aux Etats-Unis les exploitations peuvent augmenter leurs revenus de 30% avec l'application des systèmes agrivoltaïques.

Le développement de l'énergie photovoltaïque contribuerait à atteindre l'objectif de réduire le réchauffement planétaire (INERA, 2020). Leur installation sur des terres agricoles viendrait répondre aux contraintes de la recherche d'espace et pourrait participer à l'atteinte des objectifs que les pays se sont fixés en termes de transition énergétique. Les caractéristiques des systèmes agrivoltaïques étant continuellement affinées, les performances de production énergétique sont également améliorées (Valle et al., 2017).

D'après une étude de modélisation menée par (Malu et al., 2017) en Inde pour la viticulture, les systèmes AV implantés dans les vignes permettraient de satisfaire la demande énergétique de près de 15 millions de personnes tout en maintenant les rendements de raisins.

Toutefois, si l'agrivoltaïsme est une solution innovante qui pourrait répondre aux enjeux économiques et énergétiques du monde agricole, il est essentiel que le secteur puisse réduire son impact sur l'environnement notamment par la diminution des émissions des gaz à effet de serre. Campana et al., 2016 souligne à cet effet que l'utilisation de l'énergie photovoltaïque plutôt que le diesel pour alimenter les machines agricoles permettrait de réduire les émissions de CO₂ du secteur. Selon (Tajima & Iida, 2021), les installations photovoltaïques permettent d'apporter une protection contre les intempéries, en réduisant par exemple l'érosion par éclaboussures des cultures placés en dessous. Selon Amaducci et al., 2018, la réduction de l'évapotranspiration sous PV peut également diminuer les pertes de rendement pendant les années sèches. La modification des paramètres microclimatique du sol, soit une humidité plus élevée (Hassanpour Adeg et al., 2018), ou une diminution de la température (Marrou et al., 2013b) sont bénéfiques à la production agricole.

L'ombre est un paramètre important qui affecte la performance des cultures d'un système AV. Cependant, la croissance des cultures dépend également d'autres facteurs tels que le vent, l'air, le sol, la température et les précipitations.

II. L'AGRIVOLTAÏSME

II.1 Revue bibliographique

II.1.1 Définition(s) de l'agrivoltaïsme

Dupraz et al., 2011, ont défini le terme « agrivoltaïsme » comme étant la combinaison d'une production agricole et énergétique sur une même surface terrestre. Le concept se décline également sous d'autres dénominations comme « Solar sharing » (Japon), « agrophotovoltaïque » (Allemagne) ou « Photovoltaïque Agriculture » (Chine) ou encore « Dual use » (Vietnam), (Brohm & Nguyen, 2018).

La définition de l'agrivoltaïsme peut varier d'un pays à l'autre, cependant l'objectif de base reste d'optimiser l'utilisation des terres.

Au Japon, le ministère de l'agriculture de la forêt et de la pêche (MAFF) a défini le 'solar sharing' comme étant « une installation photovoltaïque sur des terres agricoles avec une continuité des activités agricoles » (Ministère de l'agriculture, de la forêt et de la pêche, s. d.).

En Allemagne, des scientifiques ont défini les systèmes agrophotovoltaïques comme des : « systèmes permettant simultanément une production primaire agricole et une production électrique secondaire, par une utilisation optimale des synergies techniques et économiques » (Schindele et al., 2020).

En France, pour l'ADEME et al., 2021b : « Une installation peut être qualifiée d'agrivoltaïque lorsque ses modules photovoltaïques sont situés sur une même surface de parcelle qu'une production agricole et qu'ils l'influencent en lui apportant directement (sans intermédiaire) un des services ci-dessous, et ce sans induire, ni dégradation importante de la production agricole (qualitative et quantitative), ni diminution des revenus issus de la production agricole :

- Service d'adaptation au changement climatique
- Service d'accès à une protection contre les aléas
- Service d'amélioration au bien être animale
- Service agronomique précis pour les besoins des cultures (limitation du stress abiotique etc..) »

Au Vietnam l'agrivoltaïsme connu sous le terme « dual use » a été défini par le GreenID qui est une organisation locale à but non lucratif comme étant : « l'utilisation simultanée de la même superficie pour le photovoltaïque et la production agricole (aquaculture incluse) » (Brohm & Nguyen, 2018).

II.1.2 Les différents systèmes agrivoltaïques

Dans la littérature on retrouve plusieurs types de systèmes agrivoltaïques. Les principales installations agrivoltaïques sont de trois types (Sekiyama & Nagashima, 2019). Le premier type (ou centrale au sol), utilisant l'espace entre les rangées de PV pour les cultures est celui qui a été proposé dès les années 1980. Le deuxième type consiste en des serres agricoles équipées avec des modules PV sur leur structure, son avantage est qu'il permet une production aussi bien énergétique qu'alimentaire durant toute l'année (Scognamiglio et al., 2014). Et le troisième consiste à un ensemble de panneaux solaires relevés sur pilotis au-dessus des cultures. Il offre 2 avantages qui sont la réduction de l'ensoleillement sur la culture et du contact entre la culture et l'eau de pluie (Clément, 2020). Pour ce type de système les ombrières solaires peuvent être fixe ou mobile. La figure 1 montre les 3 systèmes agrivoltaïques.

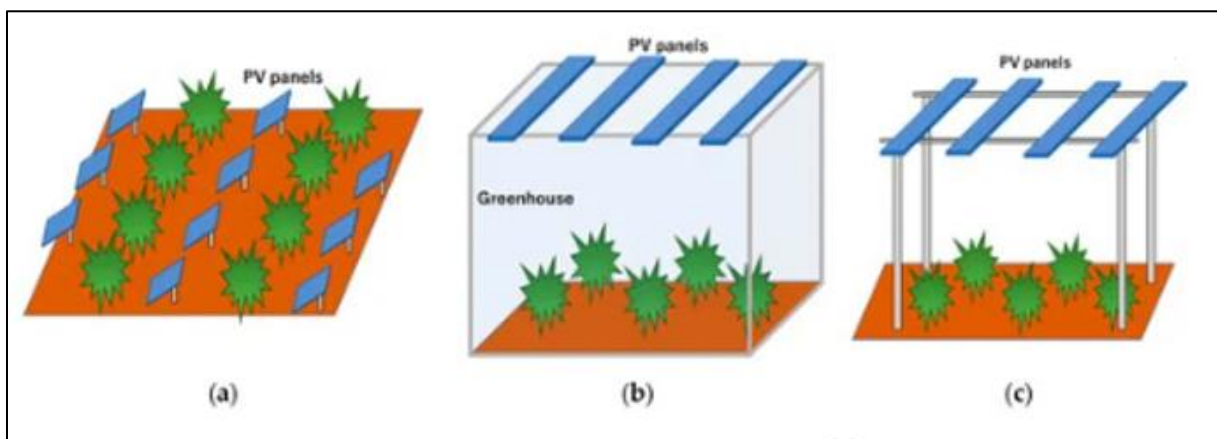


Figure 1 : Trois types différents de système agrivoltaïque : (a) utilisant l'espace entre les panneaux photovoltaïques (PV) pour les cultures, (b) une serre photovoltaïque et (c) un système sur pilotis (Sekiyama & Nagashima, 2019)

Les systèmes agrivoltaïques montés sur pilotis ont été les plus étudiés, par exemple en France avec Marrou et al., en 2013 et aux Etats-Unis, avec Majumdar et Pasqualetti en 2018. Cependant, avec les avancées technologiques, de nouveaux systèmes plus adaptés aux types de cultures que l'on veut mettre en place ont vu le jour. Selon les études menées par ADEME et al., 2021a, en France, il ressort que les serres ne sont associées qu'avec l'arboriculture, le maraîchage et l'horticulture. Les systèmes avec ombrières (mobiles ou fixes), quant à eux, sont combinés avec différentes productions végétales sauf dans les zones de prairie. Il en va de même pour les centrales au sol, sauf pour l'arboriculture. Les installations solaires au sol et sur

bâtiment sont les seules couplées avec la production animale (avec le pâturage uniquement pour le premier).

Nous présentons dans les tableaux ci-dessous la caractérisation des différents systèmes PV agricole :

❖ **Systèmes avec centrale au sol**

Tableau 1 : Type de couplage entre centrales photovoltaïques au sol et production agricole (ADEME et al., 2021a)

Caractérisation du système PV agricole		
Type d'installation	Type de production	Synergie PV/ production agricole
Centrale au sol	Pâturage (ovin), apiculture	Ombrage pour animaux, microclimat tempéré plantes
	Maraîchage Grandes cultures	Microclimat tempéré et protection des plantes
	Horticulture	Microclimat tempéré et protection des plantes
Centrale à modules bifaciaux verticaux « Est-Ouest »	Pâturage ou maraichage	Ombrage pour animaux temporaire et protection contre le vent, microclimat tempéré pour les plantes

❖ Systèmes avec serres photovoltaïques

Tableau 2 : Type de couplage entre serres photovoltaïques et production agricole
(ADEME et al., 2021a)

Caractérisation du système PV agricole		
Type d'installation	Type de production	Synergie PV/ production agricole
Serre PV	Arboriculture (kiwi...) Maraîchage Horticulture (rose, lys...)	Microclimat et protection des plantes, et peut-être utilisation de l'énergie
PV toiture	Elevage en stabulation Stockage et fourrage	Autoconsommation de l'énergie produite.

❖ Systèmes avec ombrières fixes

Tableau 3 : Type de couplage entre ombrières photovoltaïques fixes et production agricole
(ADEME et al., 2021a)

Caractérisation du système PV agricole		
Type d'installation	Type de production	Synergie PV/ production agricole
Ombrières fixes	Grandes cultures (blé, pomme de terre) Vignoble Maraîchage	Ombrage et protection des plantes Ombrages animaux
Ombrières fixes (ou serre ouverte)	Arboriculture Plantes médicinales et aromatiques Pisciculture	

Ombrières fixes avec panneaux tubulaires	Tous types de systèmes	Ombrage et protection des plantes Structures plus légères que des ombrières classiques
Centrale flottante aquacole	Aquaculture	Ombrages animaux, microclimat tempéré

Les centrales flottantes aquacoles se rapprochent des centrales au sol mais ne sont destinés qu'à la production de l'aquaculture.

❖ **Systèmes avec ombrières mobiles**

Tableau 4 : Type de couplage entre ombrières photovoltaïques mobiles et production agricole (ADEME et al., 2021a)

Caractérisation du système PV agricole		
Type d'installation	Type de production	Synergie PV/ production agricole
Ombrières mobiles (surélevées)	Grandes cultures (blé dur)	Ombrage et protection des plantes
	Vignoble	
	Arboriculture	
	Maraichage	
	Horticulture	

Nous constatons dans les tableaux ci-dessus, que la culture maraichère peut être associée à la plupart des systèmes photovoltaïques. Dans notre travail, nous étudierons sa combinaison avec le type de système « centrale au sol à modules bifaciaux » avec l'avantage d'être modulable, i.e. que les panneaux solaires peuvent être placés à la verticale ou à l'horizontal. En effet, en position verticale le module bifacial permet d'avoir une emprise au sol plus réduite et l'avantage de pouvoir couvrir une diversité de cultures maraichères.

❖ Quelques exemples d'installations et de sites d'essai à travers le monde

Plusieurs installations autant commerciales que pour la recherche à petite ou à grande échelle sur l'agrivoltaïsme ont été réalisées au cours des dernières années : certaines montées sur des structures métalliques à des hauteurs variant entre 3 et 5 m du sol, d'autres au sol, quelques-unes avec des modules bifaciaux et d'autres monofaciaux ; certains systèmes comportant un système de tracking et d'autres installés avec une inclinaison d'angle fixe. Les systèmes agrivoltaïques sont retrouvés à travers le monde : France, Etats unis, Allemagne, Belgique, l'Italie, le Japon, la Chine, le Vietnam et bien d'autres. Les figures 2 à 8 présentent quelques illustrations de systèmes agrivoltaïques mis en place à travers le monde.



Figure 2 : Ombrières mobiles surélevées sur culture de vigne (à gauche) et sur culture de blé et laitue (à droite) en France (<https://sunagri.fr/resultats-viticulture/> et (Marrou, 2019))



Figure 3 : Centrale au sol avec des modules bifaciaux montés à la verticale associée à la pâture d'une prairie sur le site de Donaueschingen (à gauche), et servant de clôture pour des vaches (à droite)

<https://next2sun.com/en/>



Figure 4 : Projet expérimentale de panneaux solaires à modules de feuilles transparentes et des cellules classiques de silicium au-dessus d'un verger de poiriers à Bierbeek, Belgique (à gauche), et de système bifacial vertical et tracker à axe unique sur le site de Grimbergen



Figure 5 : Ensemble de serre photovoltaïque en Sardaigne, Italie (Tagliaferri, s. d)



Figure 6 : Exemples d'ombrières PV au Japon (culture de riz paddy à gauche et de thé à droite)
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/einou.html>



Figure 7 : Installation d'un projet agrivoltaïque de 200 mégawatts (MW), situé sur des terres dégradées associés avec la culture d'espèces tolérantes à l'ombre (bletilla, le paeonia, le framboisier, etc.) à Jiangshan, en chine (Xiao et al., 2022)

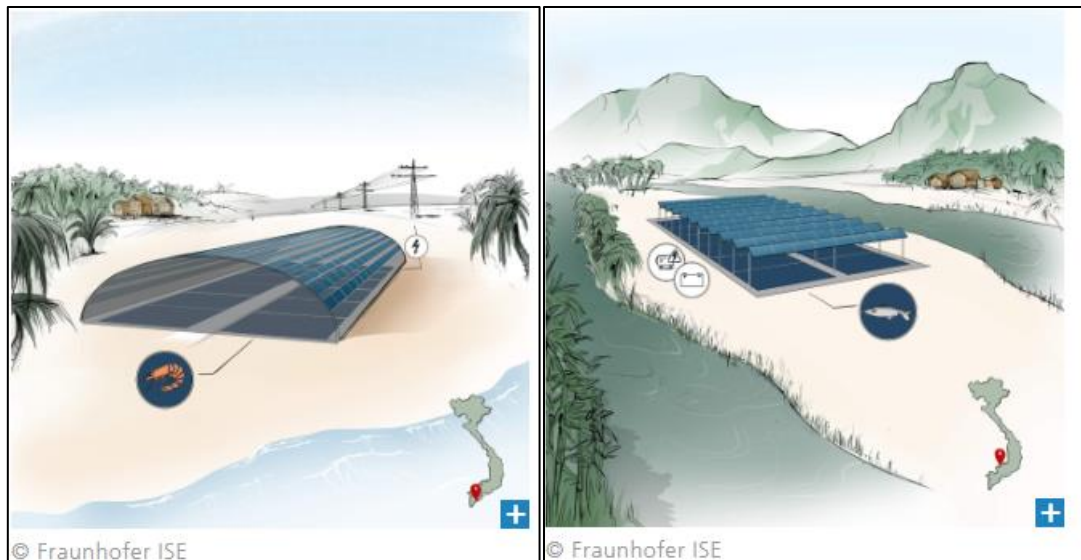


Figure 8 : Projet pilote de serre photovoltaïque de crevettes à Bac Lieu (à gauche) et de centrale photovoltaïque installée au-dessus d'un bassin d'eau contenant des Pangasius à An Giang, au Vietnam (à droite) (Fraunhofer ISE, 2019)



Figure 9 : Centrale au sol avec panneaux bifaciaux sur cultures de plantes à gauche et panneaux monofaciaux à droite sur cultures de Tomates au Colorado (US) <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/agrivoltaics.html>

❖ Agrivoltaïsme dans les cultures et le pâturage

L'agrivoltaïsme permet la culture de tout type d'espèces. Cependant pour des questions de compatibilité avec le système, ce sont les cultures horticoles qui sont les plus rencontrées sous les panneaux photovoltaïques (Marrou et al., 2013c). En effet, selon (Mamun et al., 2022), 29

activités agricoles sur l'horticulture intensive ont été recensées dans la littérature contre 25 pour les céréales et légumineuses. Pour ce qui est du pâturage des pérennes et du bétail, 6 et 2 activités agricoles ont été respectivement recensées en association avec les systèmes agrivoltaïques. Le tableau 5 ci-dessous présente un résumé de la littérature concernant quelques espèces étudiées en agrivoltaïsme.

Tableau 5 : Différentes cultures et animaux rencontrés en agrivoltaïsme

Horticulture intensive	Céréales de grandes cultures et légumineuse	Pâturage des pérennes	Pâturage du bétail
Laitue	Orge	Citronnelle	Mouton
Concombre	Blé/ Blé dur	Fougère	Chèvre
Gingembre	Maïs	Séné	Bovin (lait ou viande)
Poivron vert	Tournesol		
Piment	Thé		
Epinard	Haricot rouge		
Taro	Colza		
Tomate			
Oignon			
Fraises			

❖ Quelques résultats d'études menées sur les systèmes agrivoltaïques à travers le monde

D'après l'étude menée par Marrou et al., 2013c, les laitues qui ont reçu un ombrage important ont vu leur rendement diminué d'environ 58%. Quant à l'étude de Sekiyama et Nagashima, en 2019 sur le maïs, il est ressortit que les rendements en dessous de la configuration « faible densité¹ » étaient plus élevés, 3,54kg/m² contre 3,35kg/m² pour le témoin. Et sous la configuration « pleine densité² » ils étaient à 3,23kg/m². Xiao et al., 2022 ont montré dans leur étude sur les légumes³ les plus consommés à Jiangshan que le rendement de l'agriculture conventionnelle locale est de 57,9% supérieur au rendement des légumes cultivés dans un système AV.

¹ 24 modules espacés de 1,67 m.

² 48 modules espacés de 0,71 m

³ Niébé, Brocoli, Chou, Courgette, Chou blanc chinois.

Pour le rendement énergétique, Cho et al., 2020, ont montré dans leur étude que la production d'électricité dans des systèmes AV donnent des rendements moyens quotidiens de 25,7 MWh, 25,2 MWh et 21,6 MWh respectivement pour des modules silicium cristallin (mc-Si), bifaciaux et transparents. Aux Etats-Unis l'étude réalisé par Dinesh & Pearce, 2016 sur les laitues a montré qu'un système AV sur pilotis de densité moyenne peut rapporter environ 8 % de revenus (par hectares/an) en plus par rapport à un agriculteur conventionnel. À pleine densité, un système agrivoltaïque monté sur pilotis a un rendement d'environ 30% plus élevé que les panneaux montés au sol.

II.2 Choix des légumes pour l'expérimentation

Les légumes qui seront cultivés sur la plateforme agroforestière sous les PV pendant ce TFE ont été choisis pour s'adapter à l'ombrage des panneaux, être comestible et donner des résultats sur le temps de la réalisation de ce mémoire. Toutefois, nous avons tenus à étudier une diversité de légumes dans cette expérimentation car nous avons constaté que les études précédentes se sont principalement concentrées sur la culture de laitue (Elamri et al., 2018 ; Marrou et al. 2013a ; Marrou et al. 2013c). Dans cette logique, la culture de 2 catégories de légumes a été favorisée notamment les légumes feuilles (laitue) et les légumes fruits (haricot vert et courgette). Sur notre site expérimental, au total 3 légumes ont été testés :

❖ La laitue (*Lactuca sativa*)

Plante annuelle à feuilles légèrement dentées, allongées et disposées en rosette (R. Kroll, 1994). C'est la culture la plus utilisée pour les expérimentations dans les systèmes agrivoltaïques (Elamri et al., 2018). En effet, elle se cultive facilement, et son cycle cultural court (30 jours ou plus en fonction de la variété) fait d'elle une « candidate » idéale pour ces systèmes pionniers (Marrou et al., 2013c). En sus de cela, la plantation de laitue peut se faire à presque n'importe quel moment de l'année aussi bien en serre qu'en pleine terre (Navarrete & Le Bail, 2007). On rencontre plusieurs variétés de laitue regroupés en 3 grandes catégories que sont : les laitues à couper, les laitues pommées et les laitues romaines (catalogue-semaille, 2023).

❖ Le haricot vert

Le haricot est une légumineuse qui fait partie du genre *Phaseolus* et de l'espèce *vulgaris*. C'est une plante annuelle à tiges volubiles ou nain, originaire d'Amérique du Sud (R. Kroll, 1994). Ses feuilles sont trifoliées et pennées. C'est l'une des légumineuse la plus consommée de par

le monde pour ses gousses vertes et ses graines (Gepts, 2001). En effet les gousses peuvent être consommées avant leur maturité, après elles ne sont plus comestible. Elles sont écosées pour récolter les graines contenues à l'intérieur. La couleur des gousses et des graines est variable suivant les variétés. On distingue deux grandes catégories de haricot, que sont les haricots à rames ou grimpanes qui mesurent entre 2 et 3 m. Et les haricots nains dont la hauteur varie entre 25 et 30 cm (Polese, 2006). La culture du haricot nain ou à rames se fait généralement sur une terre perméable, saine, riche en phosphore et qui est légèrement calcaire (R. Kroll, 1994). Il faut environ 8 jours pour la levée lorsqu'elle se trouve dans des conditions optimales de températures. En effet, c'est une culture qui se développe à des températures supérieures à 10°C (fiche-culture haricot, 2012). La récolte du haricot se fait 60 à 80 jours après les semis pour les gousses fraîches et entre 90 et 130 jours pour les graines (RADHORT, 2012). Le haricot peut être cultivé ensemble ou en rotation avec le maïs et les courges (Polese, 2006).

❖ La courgette

La courgette est une plante annuelle issue de la famille des cucurbitacées. Elle est obtenue principalement à partir de la variété *Cucurbita pepo* (R. Kroll, 1994). Selon leur couleur et leur forme, on distingue 2 variétés principales : les variétés longues (classées en fonction de leur couleur) et les variétés rondes (Suamme, 2012). Facile à cultiver, elle nécessite une température chaude d'environ 18°C pour une croissance optimale (GAB/FRAB, 2009.). Les graines sont semées en pépinière et repiqué entre les stades 1 à 4 vraies feuilles sur la parcelle.

II.3 Ravageurs et maladies végétales fréquents chez les légumes étudiés

Les légumes au cours de leur croissance subissent une pression parasitaire causée autant par les maladies que les ravageurs. Les stades vulnérables sont en pépinière et pendant la croissance végétative (Grembombo, A., s.d). Les principaux parasites et maladies gênants la production des légumes que nous allons expérimentés sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Maladies et ravageurs des légumes, (Suamme, 2012.); (Mappa, 2010)

	Maladies	Ravageurs
Laitue	Cercosporiose Sclérotiniose Septoriose Virus de la mosaïque Mildiou Rhizoctonia	Pucerons Mineuse Limace Ver blanc Noctuelle défoliatrice Hepiale/Louvette (découverte sur la parcelle)
Haricot vert	Fusarium Rhizoctonia ou pourriture basale Pythium ou fonte des semis Pseudonomas Sclérotiniose Anthracnose	Pucerons Mineuse, Mouche blanche Taupin
Courgette	Oïdium, Mildiou Fusarium Virus de la mosaïque transmis par les pucerons	Nématodes, Acariens Puceron vert/noir

La plupart de ces maladies attaquent plusieurs légumes notamment l'oïdium, le mildiou, le Rhizoctonia etc. Pour ce qui est des ravageurs, le puceron est visiblement un ennemi de tous les légumes présentés dans le tableau.

III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

✓ Zone de l'expérience

Notre expérimentation est implantée sur une des parcelles agroforestières de la plateforme WASABI du campus de Gembloux agro-biotech, à l'université de Liège.

III.1 Informations pratique sur l'expérimentation

III.1.1 Choix des variétés de légumes

Les plants de courgettes et de haricots utilisés lors de l'expérimentation proviennent des semis réalisés au sein des serres du laboratoire de phytopathologie. Les variétés qui ont été utilisées sont : 'Minidor' pour le haricot (*Phaseolus vulgaris*), qui est une variété naine et très résistante aux maladies, et la 'verte non coureuse des maraîchers' pour la courgette (*Cucurbita pepo* (L.)), qui paraissait la plus adaptée pour notre expérimentation car, comme son nom l'indique, elle ne s'étale pas comme c'est le cas pour d'autres variétés de courgettes, de ce fait la mettre en dessous du panneau ne devrait pas poser un problème sur son évolution. Les graines de courgettes et de haricots proviennent de la France et sont commercialisés par l'établissement Henrion s.a en Belgique. La variété de laitue choisie est « Feuille de chêne » qui est une variété d'été. Les plants de laitue ont directement été achetés en pépinière aux serres Sauvenière.

III.1.2 Dispositif expérimental

III.1.2.1 Disposition des structures

Dans notre expérience, les panneaux photovoltaïques bifaciaux sont placés à quelques centimètres (60cm) du sol et orientés sud-est avec un azimuth de 149°C. Le modèle utilisé est JKM535M-72HL4-TV dont les caractéristiques sont présentées sur la fiche technique en annexe 6. Au total, 6 structures de panneaux composent le dispositif, subdivisées en 3 modalités. La première modalité constitue une position à la verticale permanente des panneaux, la deuxième une position horizontale permanente et la troisième une combinaison des deux premières, i.e. une position verticale jusque 11h 30, moment auquel les panneaux sont mis à l'horizontale car le soleil commence à être plus haut dans le ciel. Ils restent dans cette position jusque 14h30 et sont ensuite remis à la verticale pour le reste de la journée. Une quatrième modalité (sans structure photovoltaïque) viendra s'ajouter au dispositif et constituera la zone témoin. Celle-ci est suffisamment éloignée pour ne pas être ombragée et se trouve cependant sur la même ligne que les 3 autres pour recevoir le même ensoleillement et suffisamment proche pour être sur un sol similaire. La figure 10 montre une vue aérienne du site expérimental avec

les panneaux en position horizontale et verticale, et aussi la zone témoin où il n'y a pas de panneaux solaires installés.



Figure 10 : Photo de la parcelle d'expérimentation (crédit : Arthur Libault)

III.1.2.2 Dispositif des cultures

Trois légumes ont été plantés sur la parcelle, à savoir des courgettes, des laitues et des haricots. Pour chacun des cultivars une seule variété sera cultivée. Pour notre expérimentation nous avons 2 lignes de cultures de part et d'autre des PV comprenant des haricots et des laitues. La première ligne est située à 2,5m des PV et la seconde est également distancé de la première de 2,5m soit à 5m des PV. Les bandes de cultures ont une largeur de 0,4m et disposés parallèlement aux panneaux. La distance entre deux godets de haricot sur un rang est de 40cm, et pour les laitues l'espacement est de 30cm. Les courgettes quant à elles, ont été disposés directement en dessous des structures de panneaux. Elles y sont plantées à raison d'une courgette par mètre. Afin de réduire le développement des mauvaises herbes nous avons mis du paillage au pied de chaque plant. La figure 11 montre nos bandes de cultures (laitues et haricots) de part et d'autre des structures de panneaux et l'emplacement des courgettes en dessous de ceux-ci.



Figure 11 : Photo de la disposition des cultures sur la parcelle (crédit : Nikiema Madina)

III.1.3 Les semis

Le semis pour chaque cultivar s'est fait de manière différente pour chacun de nos légumes :

- Pour la laitue, comme mentionné précédemment, nous nous sommes procuré les plants dans le commerce.
- Pour le haricot, 4 graines ont été placés à mis hauteur dans un pot rempli de terreau et par la suite arrosées afin de l'humidifier.
- Pour la courgette, 2 graines par pot ont été semées, afin qu'une fois levée, on puisse choisir de garder dans chaque pot un plant qui sera ensuite transplanté sur la parcelle.

Après que les semis de haricots et courgettes ont été réalisés, ils ont été placés dans une logette de serre et arrosés quotidiennement. On observe la levée des plantules 5 à 6 jours plus tard. Les plants ont été transplantés sur la parcelle expérimentale une fois qu'ils avaient atteint le stade de 3 vraies feuilles pour la courgette et 2 vraies feuilles pour le haricot. Toutefois avant transplantation, nous avons fait un tri des plants afin de sélectionner les plus robustes. Les dates de semis, de transplantation et de récolte, ainsi que les quantités sont reprises en annexe 1. Il faut noter que la récolte des courgettes s'est faite chaque mardi et vendredi du 30 juin au 20 juillet.

III.1.4 Système d'irrigation des cultures

L'irrigation des plantes est assurée par un système d'arrosage avec des tuyaux microporeux qui a été installé le 08 juin, au même moment que les plantations de nos cultures. Afin de s'assurer que les plantes ne soient pas soumises à un stress hydrique, l'apport en eau a été surveillé durant tout le cycle.

III.2 Paramètres observés et mesurés

III.2.1 Mesure de l'intensité lumineuse

Le PAR-mètre a été utilisé pour mesurer l'évolution de l'intensité lumineuse au cours de la journée du 27/06/2023 sur différents points sélectionnés au préalable sur nos différentes bandes de cultures. En effet les mesures ont été faites à 2 points précis au milieu de chaque bande. Les mesures ont été prises comme présenter sur la figure 12. Celle-ci est une représentation de la modalité horizontale, toutefois, les mesures pour toutes les modalités ont suivis le même scénario.

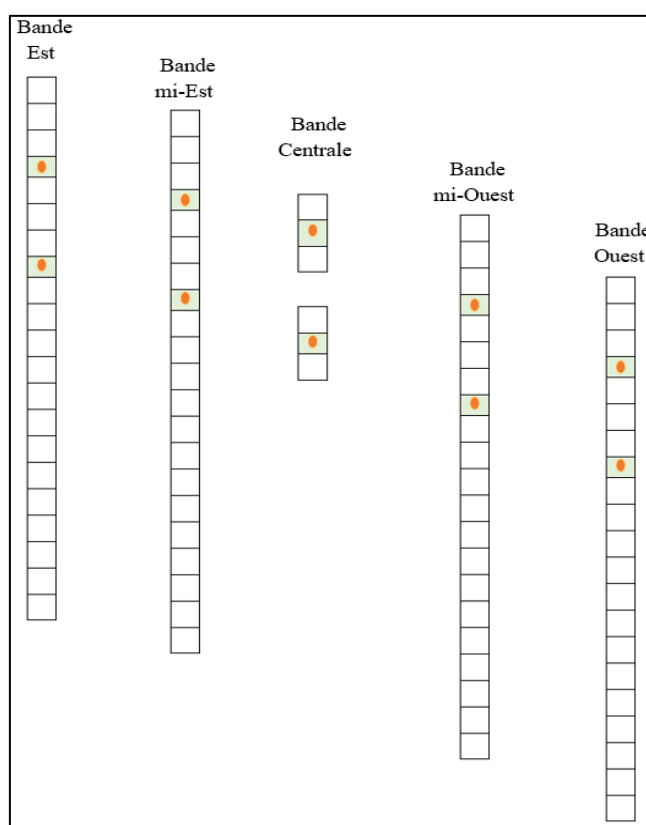


Figure 12 : Schéma des points précis mesurés avec le PAR-mètre (modèle pour la modalité horizontale)

III.2.2 Paramètres de la culture

III.2.2.1 Observation durant le cycle

Un état général des plantes sera observé quotidiennement. Une caractérisation des cultures permettra de suivre la croissance des plantes (nombre de feuilles, apparition des 1^{ers} fruits...), de suivre l'évolution des potentiels maladies, stress (nombre de plants malades, carence...). L'ensemble de ces informations permettra de fournir des éléments de comparaison entre nos différentes modalités.

III.2.2.2 Mesure de l'état des chlorophylles

La mesure de la fluorescence des chlorophylles permet de suivre l'état de santé général des plantes durant leur cycle et de savoir comment se déroule leur activité photosynthétique. Pour ce faire nous avons utilisé un fluorimètre et sélectionné de façon aléatoire les plantes à mesurer. En effet nous avons choisi de façon aléatoire 6 plants par modalité soit 24 plants par bande pour réaliser les mesures. Les mesures ont été réalisées 2 fois avec un écart de 12 jours entre les deux mesures.

III.2.2.3 Observation en fin de cycle

Afin de caractériser la production en fin de cycle de nos plantes certains paramètres repris dans les tableaux 7 et 8 ont été mesurés et/ou observés.

Tableau 7 : Paramètres étudiés pour la culture de haricot et courgette

Paramètres étudiés pour les haricots	Paramètres étudiés pour les courgettes
Quantité de fruits produits	Quantité de fruits produits
Masse des fruits	Nombre de feuilles
	Masse des fruits

Tableau 8 : Paramètres étudiés pour la laitue

Paramètres étudiés pour la laitue
Masse fraîche partie aérienne pour l'ensemble des laitues
Masse sèche partie aérienne pour 20 laitues/bande
Nombre de feuilles
Etat général

III.2.2.4 Mesure de la masse fraîche/ sèche et comptage du nombre de feuilles

La mesure de la masse fraîche a été réalisée sur l'ensemble des laitues cependant pour la masse sèche et le nombre de feuilles nous avons réalisés un échantillonnage aléatoire pour choisir 5 numéros correspondant aux laitues, et ce sont les mêmes numéros qui ont été sélectionnés sur chaque bande de chaque modalité soit 20 laitues par bande. Après la récolte, les plants ont été pesés à l'aide d'une balance directement sur la parcelle. Une fois cela fait, le nombre de feuilles a été compté pour les échantillons. Après cette étape, les plants échantillonnés sont acheminés jusqu'au laboratoire et placés dans l'étuve pour obtenir des matières sèches. Le passage à l'étuve a duré 6 jours sous une température de 75°C.

III.2.3 Consommation en eau des cultures via le système d'irrigation et apport par l'eau de pluie

Pour la consommation en eau, un débitmètre a été utilisé pour quantifier l'eau qui a servi à l'arrosage de nos cultures.

Afin de quantifier l'apport des eaux de pluies survenues au cours de notre expérience, nous avons utilisé les données de pluviométrie fournies par la station météo de Sombrefe disponible sur la plateforme "Agromet.be".

III.3 Analyse des résultats

Dans cette étude, la masse fraîche, sèche, le nombre de feuilles sont les paramètres sujet à une analyse pour la laitue. Pour ce qui est du haricot et de la courgette, uniquement la masse fraîche sera considérée. Les données obtenues lors de la récolte des plants seront analysées par un test de l'analyse de la variance ou ANOVA et une comparaison 2 à 2 de TUKEY sera réalisée avec Excel.

IV. RÉSULTATS

IV.1 Résultats des mesures du PAR-mètre

Nous avons ici les données de l'évolution du spectre lumineux que nous avons mesurés au cours d'une journée. Nous présentons uniquement les données du rayonnement direct. En effet, afin de pouvoir comparer l'intensité lumineuse arrivant sur nos différentes bandes nous avons décidé de ne pas considérer les données du rayonnement diffus.

Entre 8h et 10h30, nous remarquons que la structure horizontale fait de l'ombre à la bande mi-Ouest tandis que la bande centrale est sous le soleil. Toutefois à partir de 10h30 on observe un phénomène inverse, l'ombre commence à se retirer de la bande mi-Ouest et à arriver sur la bande centrale, ce qui induit à ce croisement entre les 2 bandes à cette heure de la journée. À 9h, il n'y a pas d'ombre sous les panneaux, ce qui explique la valeur du PAR de la bande centrale un peu élevé comme nous pouvons l'observer sur la figure13, nous observons pour les modalités verticale et modulable, que vers 9h45 il n'y a plus d'ombre projetée sur la bande mi-Ouest et Ouest. Celle-ci commence à se retrouver sous la bande centrale, en effet Nous remarquons que vers 11h30, il y'a davantage d'ombre au niveau de la bande centrale modalité horizontale et modulable (voir figure 14), ce qui se reflète sur la valeur du PAR observée à cette heure. Cependant une différence est observable à 15h30. En effet en dessous de la structure horizontale on a toujours de l'ombre tandis que pour la modalité modulable (qui est replacé à la verticale à cette heure), il n'y a plus d'ombre comme nous pouvons le constaté sur la figure 14, ce qui indique la valeur élevée du PAR de la modalité verticale. De plus à cette heure il y'a un début d'ombre qui arrive sur la bande mi-Est pour la modalité horizontale, contrairement à la modulable et la verticale qui ne projettent pas encore d'ombre sur la bande mi-Est (figure 14).

Pour le reste de nos bandes, il y'a pas de grandes différences du rayonnement direct observées au cours de la journée. En effet, au début des mesures, la bande Ouest est déjà pleinement ensoleillée pour toutes nos modalités. Quant aux bandes mi-Est et Est, après 15h30 le rayonnement n'ayant plus été directe, les données récoltées ne nous permettent pas de faire des comparaisons.

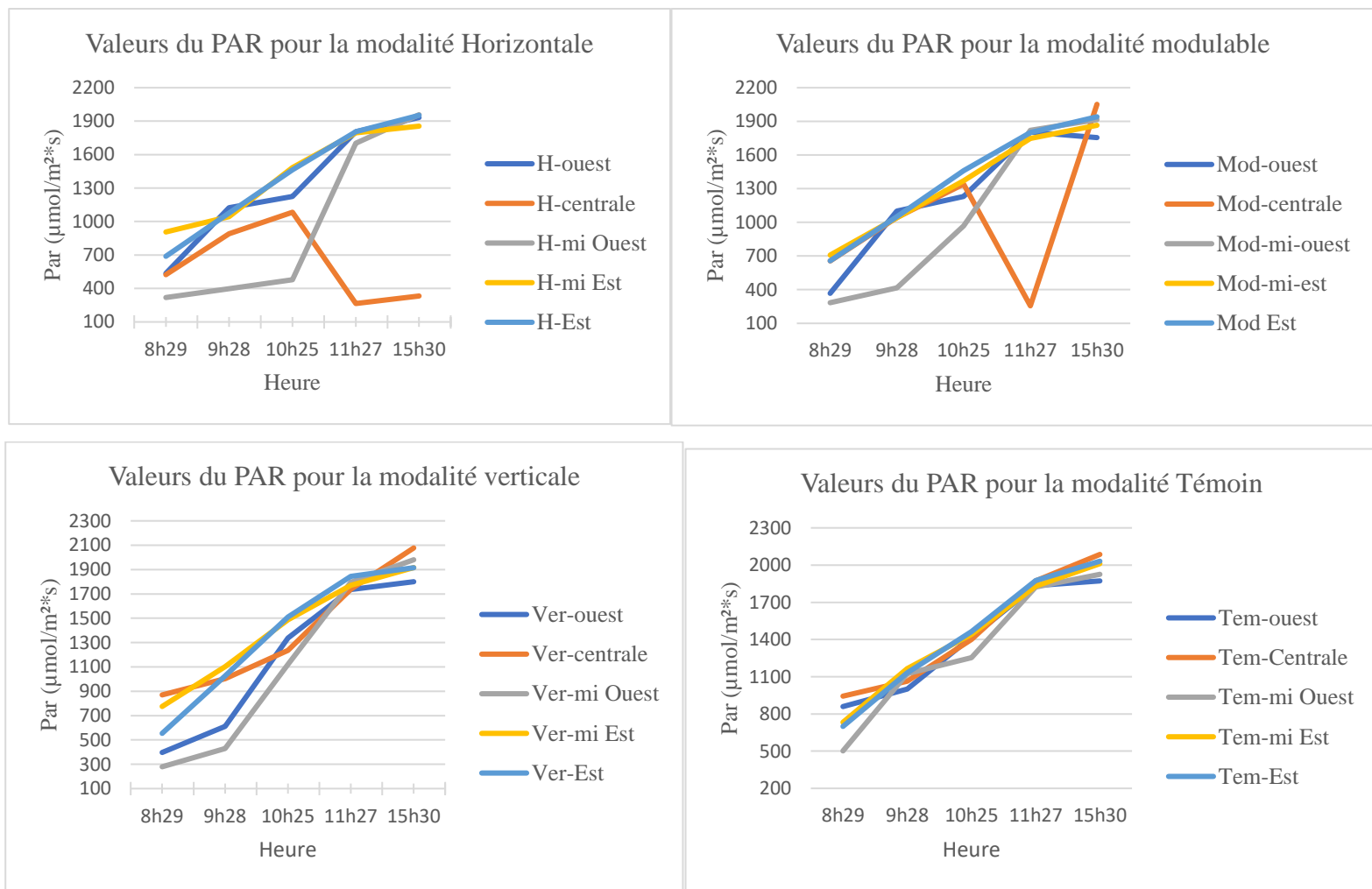


Figure 13 : Valeurs du PAR-mètre relevés pour chaque bande par modalité



Figure 14 : Photos présentant la position de l'ombre à différentes heures de la journée
(Crédit : Nikiema Madina)

IV.2 Résultats sur l'état des chlorophylles

Les résultats obtenus après mesure des feuilles de nos cultures avec le fluorimètre n'ont pas donné de résultats concluants. Après la première mesure, les valeurs du rapport Fm^4/Fv^5 relevés étaient pour la majorité trop faible (comprise entre 0,265 et 0,6) alors que la valeur adéquate de Fm/Fv qui montre que les plantes se portent bien ne doit pas être en dessous de 0,7. Toutefois nos plantes ne semblaient pas présenter de stress. De ce fait nous avons décidé de ne pas considérer ce paramètre dans notre étude.

⁴ Fluorescence maximale

⁵ Fluorescence variable : différence entre la fluorescence maximale et la fluorescence minimale

IV.3 Données de récoltes des laitues

IV.3.1 Biomasse fraîche

IV.3.1.1 Production globale

De manière générale, notre expérimentation a permis de récolter environ 103 kg de laitues pour l'ensemble des bandes et modalités pour un total de 376 plants. La figure 14 présente des box-plots de la masse fraîche de laitue par bande, avec sous-catégorie les modalités. En annexe 2 vous trouverez les box-plots de la masse fraîche de laitue par modalité avec sous-catégorie les bandes.

Sur la figure 14, il semble que la bande mi-Est est celle qui présente le moins de différence de rendement entre nos quatre modalités. Nous allons présenter de façon plus approfondie dans la suite les bandes qui présentent des différences par rapport à la modalité.

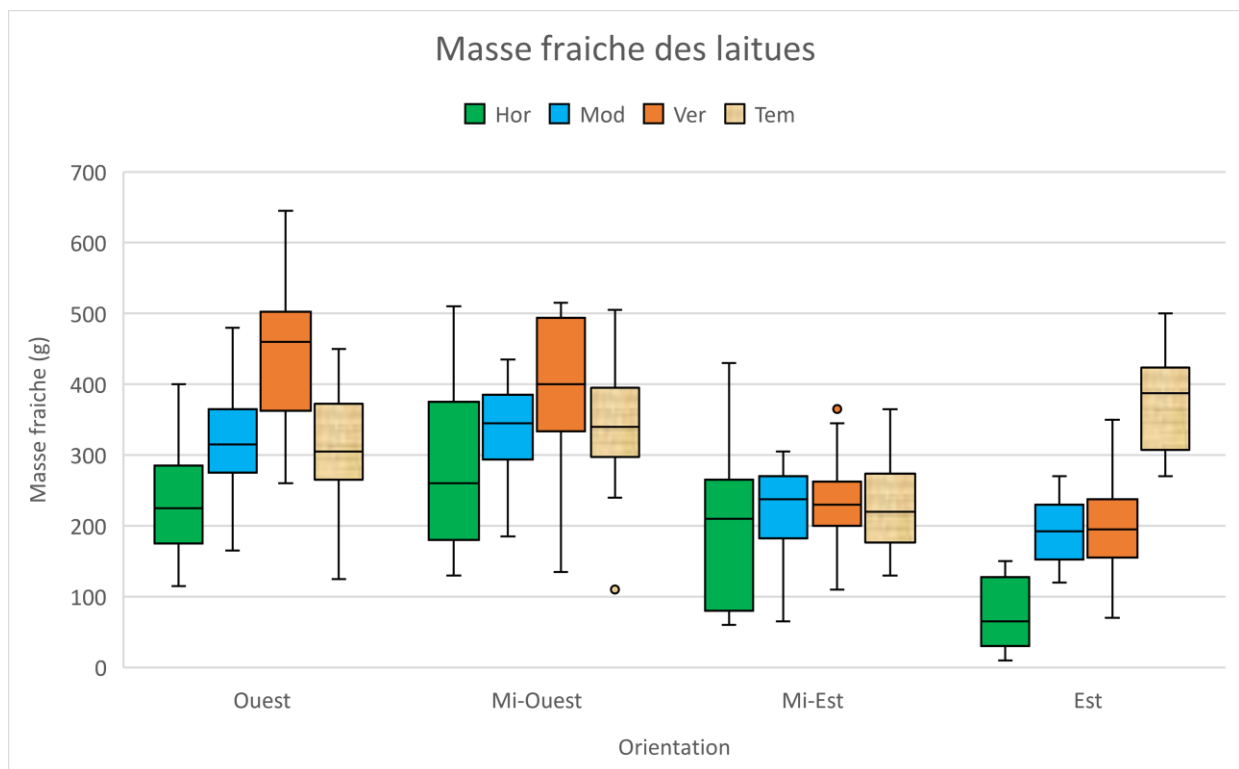


Figure 15 : Box-plots général des données de biomasse fraîche des laitues par bande avec sous-catégorie les modalités

IV.3.1.2 Production par modalité

Avec les données de masse fraîche récoltés sur la parcelle, un test ANOVA a été effectué et celui-ci nous permet de montrer qu'il existe une interaction significative entre nos modalités et nos bandes. Le test de Tukey nous permet de visualiser les différences existantes entre nos modalités en fonction de la bande

Nous observons pour la bande Ouest des différences significatives (p -valeur = $1,79E-12$) principalement entre la modalité verticale (qui a la valeur de biomasse la plus élevée) et les modalités horizontale, modulable et témoin. En effet sur la bande Ouest, c'est la modalité verticale qui a donné le meilleur rendement. Le rendement sur cette modalité a augmenté de 31% par rapport à la modalité témoin.

Pour la bande mi-Ouest, nous observons sur la figure 16 que les valeurs de biomasses fraîches des modalités modulable, verticale et témoin sont semblables, cependant elles sont différentes de la modalité horizontale (p -valeur = $0,0008$) qui a les valeurs les plus faibles. Le rendement de l'horizontale a diminué de 34,75 % par rapport au témoin.

Quant à la bande mi-Est, le test n'a pas montré de différences significatives entre les biomasses fraîches de nos 4 modalités. Toutefois les rendements sur les modalités verticale et modulable ont diminué respectivement de 8,51 et 12,27% par rapport au témoin.

Pour ce qui est de la bande Est, nous constatons des écarts importants (p -valeur = $3,6764E-21$) entre la modalité horizontale et la témoin. En effet, la production de laitue sous la modalité horizontale est très faible (moyenne de 74 gr/laitue) comparé à celle de la modalité témoin (377 gr par laitue) qui était la meilleure. Nous observons également une différence significative ($1,0788E-11$) entre l'horizontale et les modalités modulable et verticale. Toutefois, nous remarquons qu'entre le modulable et la verticale il n'y a pas de différence significative observée.

Du fait qu'il soit aussi pertinent de visualiser (dans le sens inverse) les différences entre les bandes pour une même modalité, nous avons agencé les données sous forme de box-plots également pour montrer les différences observées sous un autre angle. (Voir annexe 3).

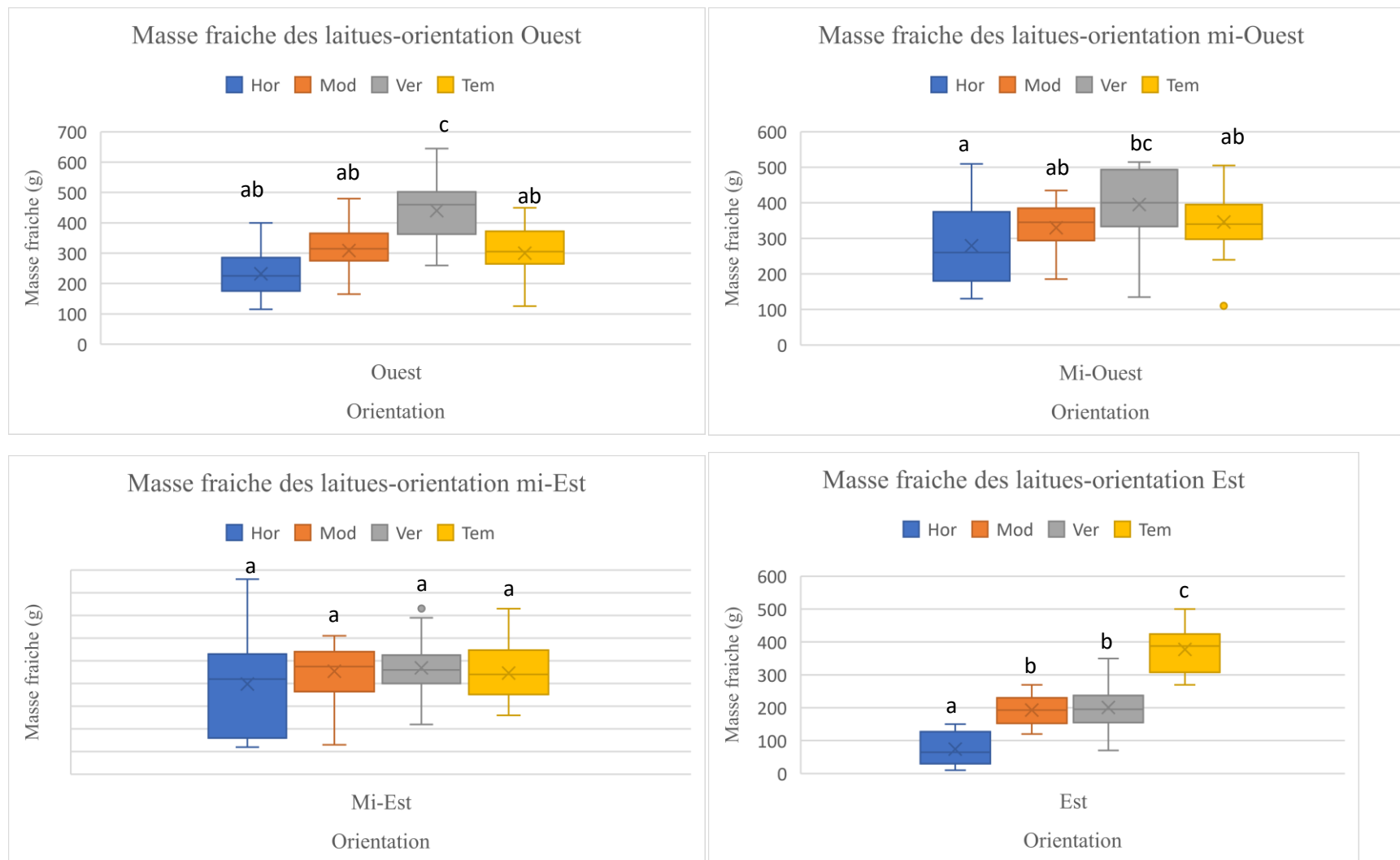


Figure 16 : Box-plots des données de masse fraîche des laitues par bande avec sous-catégorie les modalités

IV.3.2 Biomasse sèche

Pour les données de masse sèche, nous avons statistiquement fait les mêmes analyses que pour la masse fraîche. Nous les avons obtenues après séchage des échantillons de laitues sélectionnés (5 plants/bande de chaque modalité). La figure 17 présente les résultats obtenus. Tout comme pour la masse fraîche, le test sur les valeurs échantillonnées présente des différences significatives entre les modalités et aussi entre les bandes. En effet, les tendances de significativité sont assez similaires entre les résultats de la masse sèche et de la fraîche.

Nous observons des différences significatives sur la bande Est entre la modalité horizontale et la témoin (p -valeur = 0,0008) entre. Nous remarquons qu'entre le modulable et la verticale, il n'y a pas de différence significative observée. En revanche, nous constatons une différence significative (p -valeur = 0,007) entre l'horizontale et les modalités modulable et verticale.

Pour les bandes Ouest, mi-Ouest et mi-Est, le test n'a pas montré de différences significatives entre nos 4 modalités.

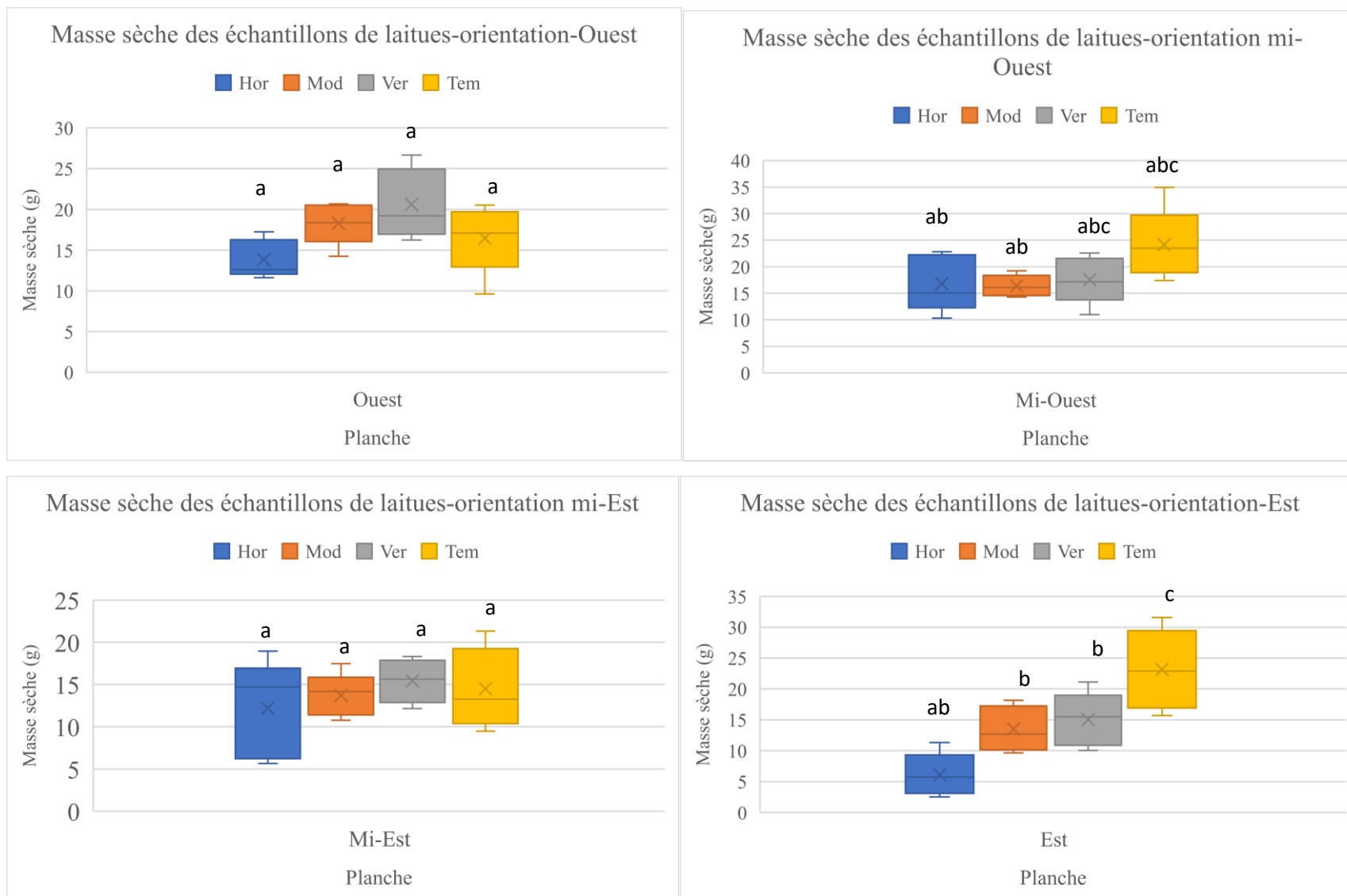


Figure 17 : Box-plots des données de masse sèche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bande

IV.3.3 Résultats des nombres de feuilles

Avant séchage des échantillons, le nombre de feuilles de chaque plant a préalablement été compté. Les box-plots de la figure 20 présentent les résultats du test de Tukey appliqué pour comparer également l'interaction entre les bandes et les modalités. Le test montre l'absence d'effet sur le nombre de feuilles entre nos 4 modalités pour les bandes Ouest et mi-Ouest. Toutefois pour la bande Est, d'importantes différences entre la modalité horizontale et les modalités verticale et témoin sont observées, avec un nombre de feuilles plus élevé sur la témoin. Des différences importantes (p -valeur = 0,007) ont été constatées sur la bande Est entre la modalité horizontale et témoin avec toujours la valeur la plus faible pour la modalité horizontale. Nous faisons le même constat sur la bande mi-Est.

Nous avons trié les données de sorte que les différences soient observables entre les bandes pour une même modalité. Par exemple pour la modalité témoin, les différences sont observées entre la bande Ouest et mi-Ouest et mi-Est, comme présenté à l'annexe 2.

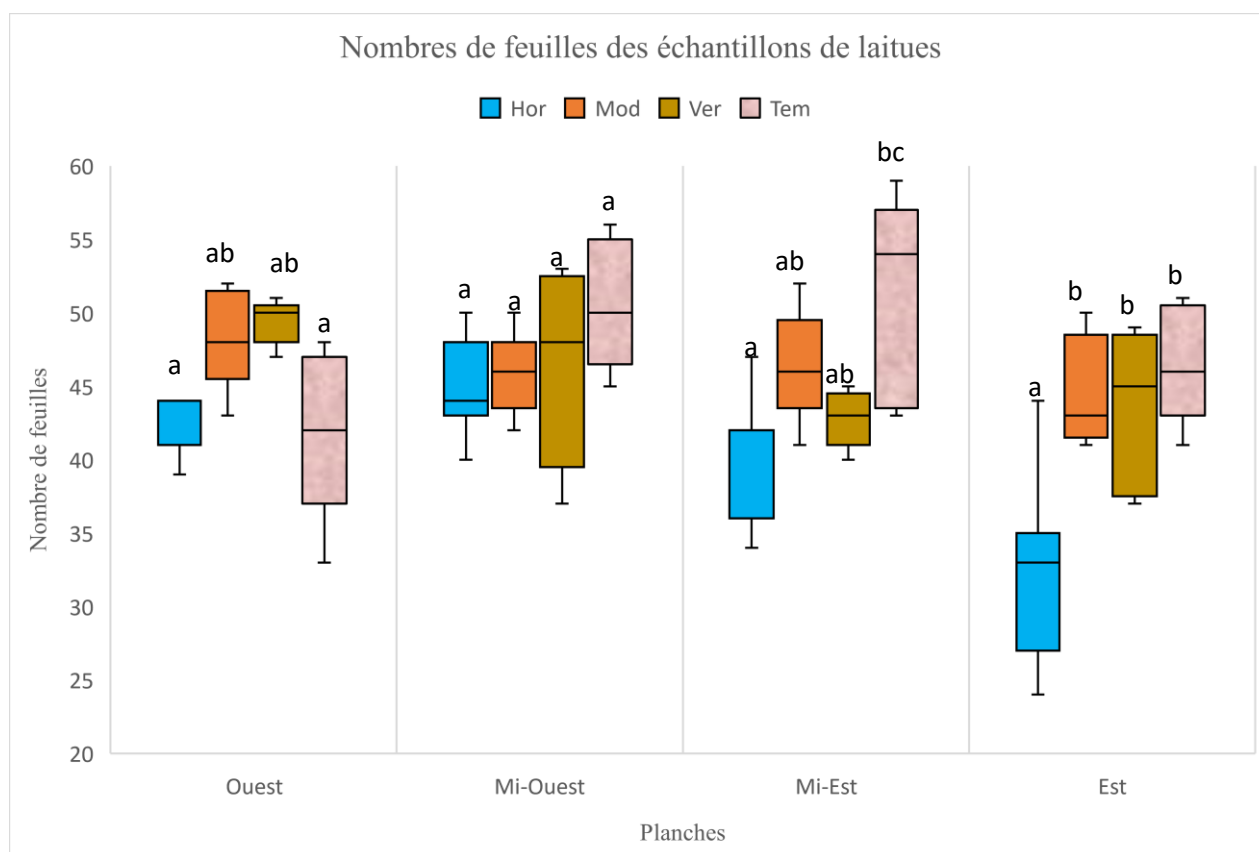


Figure 18 : Box-plots des données sur le nombre de feuilles de chaque bande pour les 4 modalités

IV.4 Données de récoltes des haricots verts

Pour les haricots, la masse totale de chaque section de bande a été renvoyé au nombre de plants afin d'être le plus correct possible dans les résultats. Ces résultats sont présentés sur la figure 19. Près de 12kg de haricots ont été récoltés le 18 juillet sur l'ensemble de notre parcelle. Nous observons que la bande mi-Ouest semble être celle qui a le plus produit dans presque toutes les modalités. Le rendement pour la modalité verticale est de 16.16 % plus élevé par rapport à la modalité témoin pour cette bande. Nous constatons l'inverse pour la bande mi-Est qui semblerait en effet avoir moins bien produit. Nous remarquons également un semblant de gradient dans le rendement de la bande Est. En effet, sa production de haricots est importante à mesure que nous allons de la modalité horizontale vers la témoin. Nous observons également ce gradient sur la modalité horizontale où le rendement par plant décroît de l'Ouest vers l'Est. Ces 2 observations sont assez similaires à celles présentées dans la section IV.3.1 pour les laitues.

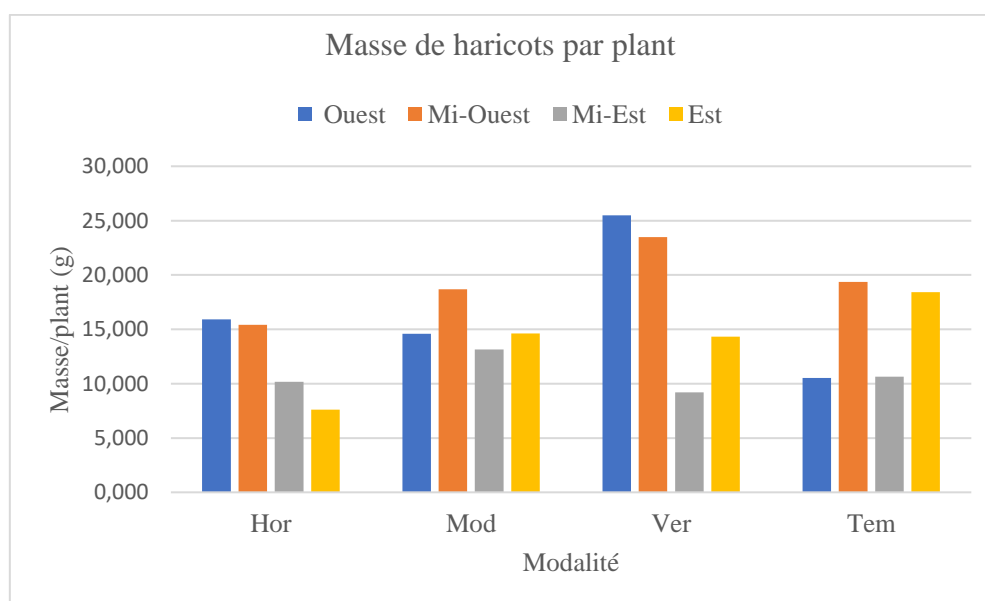


Figure 19 : Masse par plant de haricot de chaque bande pour les 4 modalités

IV.5 Données de récoltes des courgettes

La récolte des courgettes a débuté le 30 juin, et s'est faite 2 fois par semaine pendant 3 semaines. La figure 20 présente les quantités récoltées pour chaque modalité durant cette période. Pour l'ensemble des récoltes, ce sont 45,112 kg de courgettes qui ont été récoltés toutes modalités confondues.

Nous remarquons que les premiers fruits récoltés le 30 juin étaient sur la modalité horizontale et modulable. Cependant, le 11 juillet, les plus grandes quantités ont été collectées sur les modalités verticale et témoin. Les courgettes sous les modalités horizontale et modulable ont moins produit que les 2 autres modalités. En effet, la quantité de courgettes récoltée sur la modalité verticale (15,462 kg) est un peu plus élevée que celle récoltée sur la modalité témoin (14,786 kg). Sur la modalité horizontale et modulable, ont été récoltés respectivement 7,54 kg et 7,31 kg de courgettes. Il y a une différence d'environ le double entre les quantités récoltées sur les modalités horizontale et modulable, et celles récoltées sur la verticale et le témoin. Les rendements de courgettes sur la modalité verticale sont de 4,37% plus élevés par rapport au témoin.

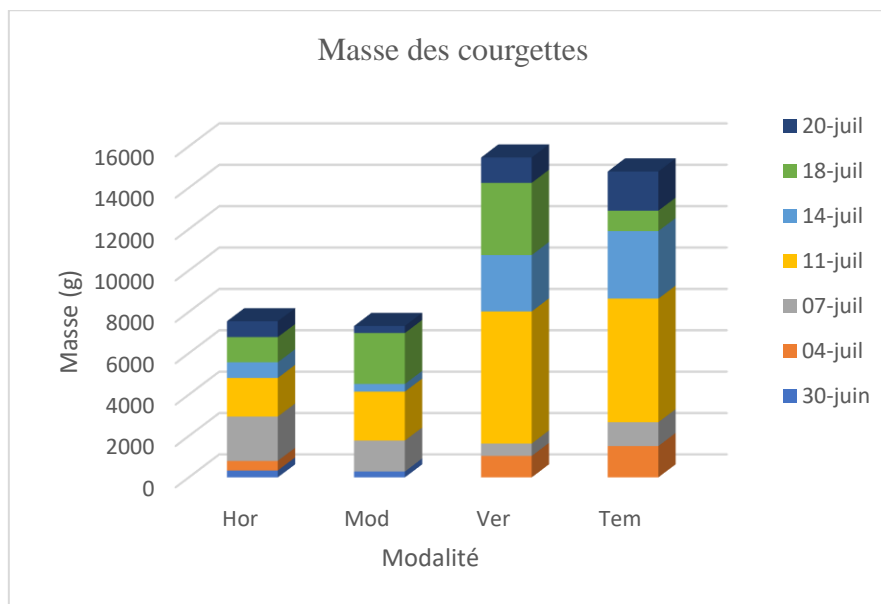


Figure 20 : Masse des courgettes sur chaque modalité

Au cours de l'expérience, nous avons également observés l'évolution du nombre de feuilles de courgettes. Nous remarquons sur la figure 21 que le nombre de feuilles est allé d'environ 5 à plus de 30 sur chacune des modalités. Nous avons constaté que leur nombre était plus élevé sous la modalité horizontale et modulable au départ (14/06/2023). Cependant au dernier jour

de quantification (17/07/2023), c'est sur les plants en dessous des modalités verticale et témoin qu'ils y avaient le nombre de feuilles le plus élevé.

Nous avons alors réalisé une ANOVA qui a montrée des différences significatives (p -valeur = $1,6415E-54$) entre les dates. Le test de Tukey nous a permis dès lors de comparer 2 à 2 les dates. Et cela montre, que c'est à partir du 03 juillet que le nombre de feuilles des modalités verticale et témoin ont commencé à être plus important que sur les 2 autres modalités.

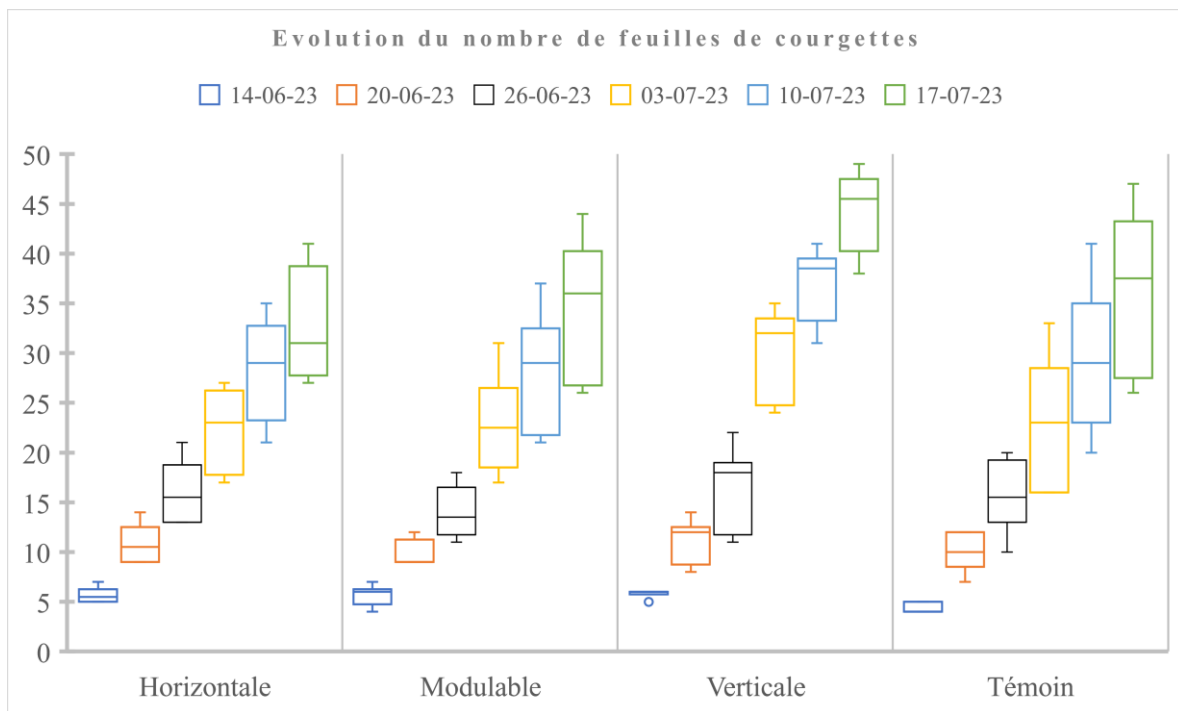


Figure 21 : Evolution du nombre de feuilles de courgettes pour les 4 modalités

IV.6 Quantification de la consommation en eau

Au cours de notre expérience, tel que mentionné dans la section III.1.5 nous avons utilisé un système d'irrigation de goutte à goutte. Toutefois, l'apport en eau aux plantes via ce système ne s'est fait que 3 fois. En effet, nous avons eu des épisodes de pluies assez réguliers, ce qui a permis de réduire l'utilisation de l'eau du puit. Cependant, avec ces pluies nous n'avons pas eu l'occasion d'arroser les bandes selon leurs besoins, pourtant cela nous aurait éventuellement permis de noter des différences dans les quantités d'eau apportées selon la bande. Les figures 22 et 23 montrent les quantités d'eau apportées aux plants via l'eau de puit et l'eau des précipitations. Le premier jour de la transplantation, l'apport en eau de puit était conséquent. Cet apport est répété chaque 3 jours mais avec une réduction de la quantité d'eau apportée.

Pour ce qui est des courgettes, se trouvant directement sous les panneaux, l'arrosage s'est fait à la main. De plus n'étant pas totalement exposées aux précipitations, nous avons jugé judicieux de ne pas prendre en compte ses apports en eau afin d'éviter au maximum tout biais.

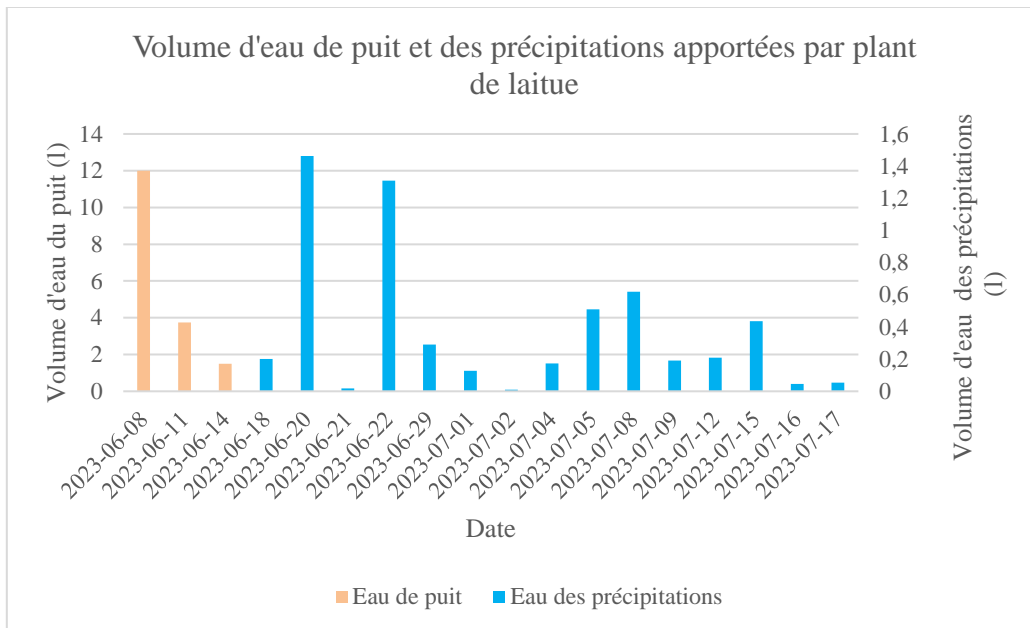


Figure 22 : Apport en eau de puit et des précipitations aux plants de laitues

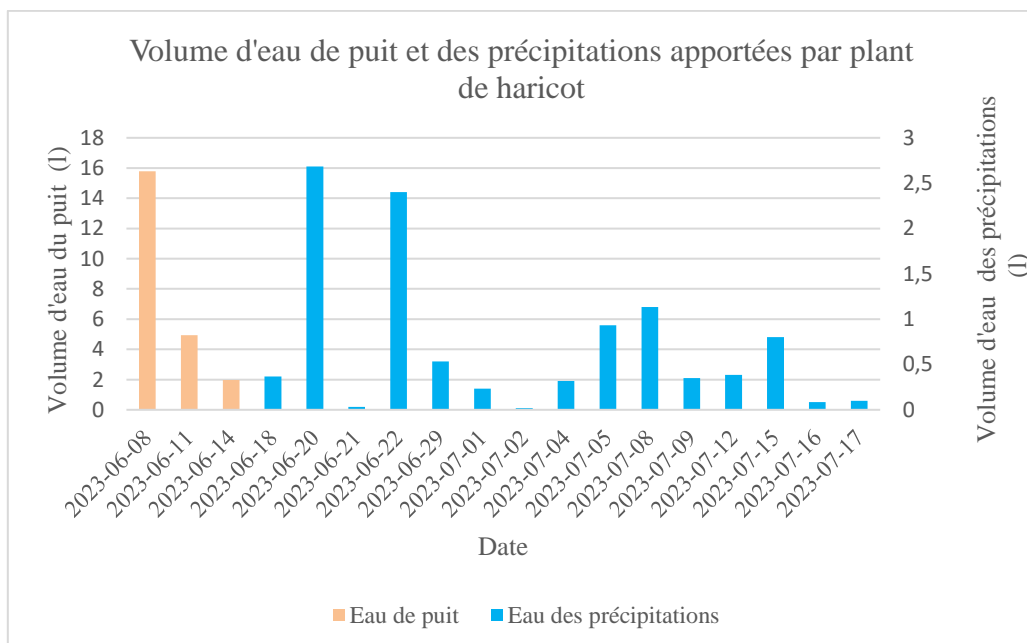


Figure 23 : Apport en eau de puit et des précipitations aux plants de haricots

IV.7 Risques biologiques rencontrés

Au cours de l'expérimentation, nous avons eu des pertes de cultures aussi bien de haricots que de laitues. Les pertes de haricots semblent avoir été causées par le rat taupier, et les pertes sont localisées uniquement sur le côté témoin-Est de la parcelle. Quant aux laitues, le principale responsable des pertes est l'hépiale louverette. Nous avons quelque fois eu des pertes dues au taupin également. Sur la bande Ouest de la modalité horizontale principalement, nous avons observé une décoloration des feuilles de quelques plants de haricots tel que présentées sur la figure 24.

Sur les courgettes nous n'avons pas observé de pertes des fruits. De plus le paillage qui a été réalisé dès la plantation a permis de réduire le développement des mauvaises herbes autour de la plante et d'économiser de l'eau. Toutefois nous avons constaté une apparition d'oïdium début juillet sur certains plants de la modalité horizontale.



Figure 24 : Carence observée sur les feuilles de haricot (à gauche) et feuille de courgette atteint d'oïdium (à droite)

V. BILAN ÉCONOMIQUE DES RÉCOLTES

Dans cette section nous avons souhaité présenter le bilan économique de notre production de légumes.

Un suivi monitoré n'a pas été mis en place pour l'ensemble des tâches effectuées. Cependant, quelques catégories de tâches nous permettent de visualiser les coûts de la production. Notamment la rotation des panneaux, l'irrigation et la récolte. La figure 25 représente le nombre d'heure mis dans chaque tâche, et ce qui représente un total de 51 heures travaillées.

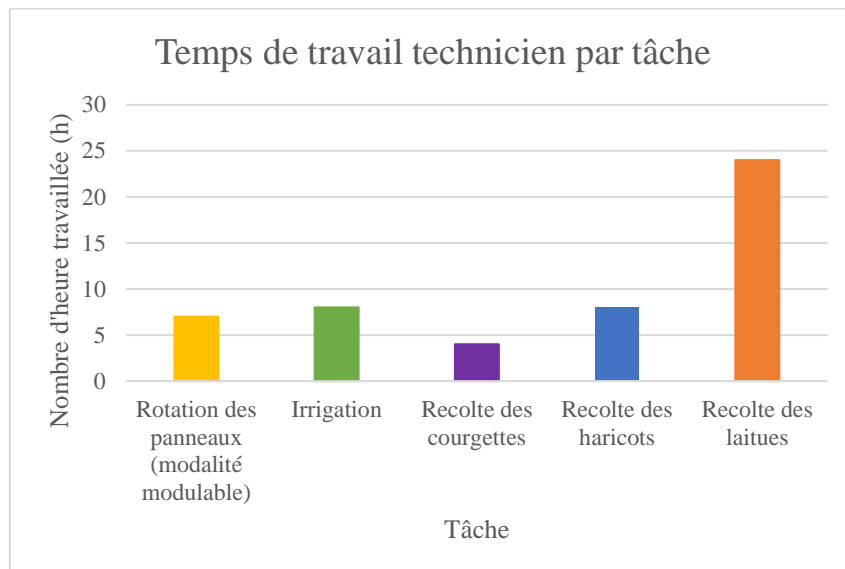


Figure 25 : Temps total de travail technicien par tâche

L'eau est le seul intrant apporté aux plantes, pour un total de 13,9m³ (uniquement pour l'eau du puit). En effet, aucun fertilisant ou engrais n'a été apporté sur la parcelle. Dans notre expérimentation les récoltes n'ont pas été vendus. Cependant, nous avons réalisés une estimation de ce qu'elles auraient values sur le marché, afin de déterminer le potentiel bénéfice qui aurait pu en ressortir. Les prix moyens utilisés proviennent de « l'observatoire des prix des fruits et légumes » pour l'année 2022. De plus, le maraicher exploitant les parcelles agroforestières de WASABI nous a également communiqué des informations sur les prix que l'on retrouve sur le marché belge pour nos légumes. Et ceux-ci sont assez similaire à ceux de l'observatoire repris dans en annexe 5.

Les revenus de récolte, les coûts induits par les tâches ainsi que ceux de l'apport en eau sont les seuls éléments pris en compte pour réaliser ce bilan. En effet, les coûts d'investissements ne sont pas considérés parce qu'il aurait fallu pour cela avoir également le revenu de la production

énergétique des panneaux solaires pour évaluer la rentabilité du système entier. Le tableau 9 reprend les coûts des intrants et des tâches réalisées ainsi que les revenus estimés des légumes.

Tableau 9 : Bilan des coûts entrées et sorties

Coûts entrés (Revenus des cultures)			
	Laitues	Haricots	Courgettes
Unité	(Nombre)	(Kg)	(Kg)
Biomasse fraîche	376	12,005	45,112
Prix/pièce ou kg (€)	1,5	9	3,16
Revenus (€)	564	108,045	142,55
Coûts sortis (main d'œuvre et intrants)			
	Unité	Volumes consommées	OPEX (€)
Technicien 23,95€/h brut	(h)	51	1221,45
Eau 5,29€/m³	(m ³)	13,9	73,531
Total			
Coûts d'entrés	814.59 €		
Coûts sortis	1294.94 €		
Bilan (coûts entrés-sortie) €	-480,38 €		

Nous constatons sur le tableau 9 que le prix de revient est négatif (-480 euros). Ce qui indique que les dépenses étaient plus élevées que les revenus issus de la production des légumes. Toutefois, étant dans un milieu de recherche, la rentabilité n'était pas l'objectif recherché.

Dans l'optique d'être rentable sur une telle surface (600m²), il aurait été intéressant d'exploiter davantage la surface disponible. Par exemple, mettre 4 bandes de par et d'autre plutôt que 2. Cela aurait permis une production plus importante de légumes. Toutefois, des investissements supplémentaires pourront être engendrés par l'extension du système et devront dès lors être pris en considération.

VI. DISCUSSION

VI.1 Effets sur les paramètres étudiés des laitues

Le premier paramètre étudié, concernait la biomasse fraîche. Les différences observées sont significatives entre le facteur bande et le facteur modalité. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences. L'ombre pourrait expliquer le fait que les rendements sur la bande mi-Est pour toutes les modalités soient les moins importantes de toutes les bandes. En effet l'ombre du matin semble avoir été plus bénéfique à la bande mi-Ouest que l'ombre de l'après-midi à la bande mi-Est. Il se peut que, malgré l'ombre du matin sur la bande mi-Ouest, cette dernière a profité aussi de la pleine lumière une fois l'ombre passée et les laitues ont ainsi pu se développer correctement. À l'inverse, la bande mi-Est était à l'ombre l'après-midi lorsqu'il y'avait la pleine lumière et cela a entraîné ainsi un développement moindre des laitues sur cette bande. Les modalités verticale et modulable ont donné quasiment les meilleurs rendements sur la bande Ouest et Est. Leur position verticale le matin et le soir a permis à leur ombre d'être projetée plus loin, ce qui pourrait expliquer les résultats constatés.

Un second facteur qui pourrait expliquer les différences observées est le tassement du sol. Il est probable que lors de la plantation de des arbres présent sur le site, le passage pour les entretenir et pour accéder à la parcelle du fond aient entraîné un tassement du sol qui a pu avoir un impact sur le développement des racines de nos laitues au niveau des bordures de la modalité horizontale bande Est. L'enracinement des plantes étant plus difficile sur les sols compacts, cela pourrait être un facteur a considéré dans les différences de résultats. Au-delà des différences observées, nous remarquons un gradient croissant, allant de l'horizontale vers le témoin, pour presque toutes nos bandes, sauf pour les bandes Ouest et mi-Est, où on a une diminution des valeurs au niveau de la témoin. Ce gradient représente la pente de la parcelle. Les valeurs plus élevées au fur et mesure qu'on avançait vers le témoin pourraient t s'expliquer par la dureté du sol plus prononcé sur les premiers mètres. En effet, lors du travail du sol nous avons observés que le sol était bien plus compact au début et devenait un peu plus meuble à mesure qu'on allait vers le témoin.

Pour les nombres de feuilles, les différences observées sont assez faibles, mais certaines restaient tout de même significatives. Il semble que ce paramètre n'ait pas été trop impacté que ce soit par l'emplacement des bandes ou par les modalités. Cependant, l'origine de la grande variance observée au niveau de la modalité horizontale entre mi-Ouest et Est peut être imputable

au fait que nous avons dans notre échantillon plusieurs plantes de petites tailles avec peu de feuilles.

Cette sélection d'échantillons a aussi été faite pour l'étude du paramètre 'masse sèche'. Cependant les différences observées sont presque similaires aux observations pour la masse fraîche.

VI.2 Effets sur les cultures de haricots et courgettes

Pour ce qui est des haricots, la bande mi-Est, semble être celle qui a quasiment le moins bien produit par rapport aux autres.

L'ombre pourrait être à l'origine de cette observation. En effet, tout comme pour les laitues, l'ombre du matin semble avoir été plus bénéfique pour les haricots de la bande mi-Ouest. Cette bande semble avoir eu les meilleurs rendements dans les différentes modalités, contrairement à l'ombre de l'après-midi sur la bande mi-Est, qui semble ne pas avoir été bénéfique aux haricots. Le manque d'apport en nutriment a également pu jouer un rôle sur l'évolution des plants. En effet, cela pourrait expliquer la décoloration observée sur certains plants de haricots, qui semble résulter d'une carence en magnésium.

Pour les courgettes, les résultats obtenus vont du simple au double entre les modalités horizontale, modulable et les 2 autres modalités (verticale et témoin). Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment les conditions météorologiques observés les jours précédents le 11 juillet. C'est en effet à cette date que de grande masse de courgettes ont été récoltées sur la modalité verticale et témoin, contrairement aux modalités horizontale et modulable. Les pluies du 08 et 09 juillet suivies des températures chaudes semblent avoir eu un effet positif sur le développement des courgettes sous les modalités verticale et témoin.

La position des panneaux est aussi un facteur qui pourrait expliquer les différences observées. En effet pendant les jours de soleil, les courgettes qui se trouvaient sous les modalités horizontale et modulable étaient protégées par l'ombre. Elles ont poussé rapidement et donné les premiers fruits, contrairement aux courgettes sous les modalités verticale et témoin. Lorsque le temps est devenu un peu plus pluvieux, les courgettes sous les modalités témoin et verticale ont commencés à produire plus de fruits, rattrapant ainsi leur retard. Dans le même temps, celles sous les modalités horizontale et modulable semblaient avoir trop d'ombre, ce qui a négativement impacté leur production.

Ces facteurs ont pu avoir le même effet sur les feuilles entraînant un développement plus important sur les modalités verticale et témoin. Le nombre de feuilles de courgettes plus

important à partir du 03 juillet a pu aussi contribuer aux rendements de courgettes observés sur ces 2 modalités. En effet, les feuilles offrent une certaine protection aux plantes participant ainsi à leur bonne croissance.

Les panneaux à l'horizontal pourraient réduire l'évaporation du sol, maintenant ainsi un haut niveau d'humidité des sols. Cette humidité semble avoir engendré l'apparition de l'oïdium dès début juillet, sur certaines feuilles de courgettes de cette modalité.

VII. RECOMMANDATIONS

Dans le cadre de la réitération d'une étude similaire, il serait intéressant de prévoir une période d'étude suffisamment longue pour tester des cultures à cycle long et/ou qui ont des exigences en matière d'ensoleillement différentes de celles expérimentées dans mon travail. En effet l'étude menée par Sekiyama & Nagashima, en 2019 a montré que le maïs (culture intolérante à l'ombre) pouvait donner de bons rendements sous des systèmes AV. Dès lors, des études sur les tomates, les poivrons ou les piments seraient intéressantes à être mener, ce qui contribuerait à pallier le peu d'études scientifiques réalisées sur ce type de cultures, dans le contexte de l'agrivoltaïsme. Dans la même lancée, il serait pertinent d'augmenter les bandes de cultures de part et d'autre des panneaux pour maximiser l'espace de la parcelle et permettre d'étudier une plus grande diversité de cultures.

L'étude du microclimat serait intéressante pour évaluer l'effet des panneaux photovoltaïques sur les variations de température, d'humidité et d'évaporation. Pour cela, la mise à disposition de matériels adéquats pour le suivi du microclimat est nécessaire et permettrait ainsi de se rendre compte de l'impact de tels changements sur la croissance des plantes.

Il semble y avoir eu un effet du sol sur les résultats à certains endroits. Il serait donc judicieux de faire des analyses du sol qui nous permettraient d'attester de son homogénéité et aussi d'évaluer sa fertilité au cours du temps.

Pour cause de contraintes techniques, mon étude n'a pas pu explorer l'aspect économique global du système agrivoltaïque. Toutefois, il serait important dans la perspective d'évaluer la viabilité économique d'un tel système de compléter mon étude, en effectuant une analyse économique complète de celle-ci, prenant en compte les coûts d'installation, les revenus agricoles et ceux de la production énergétique.

Il serait intéressant d'automatiser la partie modulable, afin qu'elle puisse suivre la course du soleil de manière plus optimale. Cela permettrait potentiellement d'augmenter la production énergétique.

Dans notre expérimentation, nous avons adapté la modalité modulable à la production énergétique. En effet les panneaux étaient mis à l'horizontale puis à la verticale pour suivre la course du soleil. Il serait intéressant pour une étude future de plutôt l'adapter à la croissance des plantes. Nous avons vu que les positions horizontale et modulable semblent avoir gêné la croissance des courgettes en période pluvieuse. Dès lors, mettre les panneaux à la verticale lorsqu'on a des temps pluvieux pour éviter de faire trop d'ombre aux cultures et à l'horizontal lorsqu'on a beaucoup de soleil pour capter l'énergie solaire et en même temps protéger les cultures permettrait potentiellement d'avoir une meilleure croissance des cultures.

CONCLUSION

Notre étude nous permet de tirer différents enseignements. Sur le plan cultural, 376 laitues, 12 kg de haricots et 45 kg de courgettes ont été produits sur l'ensemble de la parcelle. La comparaison de nos 4 modalités a mis en évidence des différences significatives entre elles pour chacun des 3 légumes étudiés. Ces différences sont expliquées pour la majorité par l'effet de l'ombre sur les cultures. La masse fraîche (trop faible) de certaines laitues sur la bande Est modalité horizontale a également mis en évidence l'influence du sol sur le développement des cultures.

Les modalités horizontale et modulable ont maintenu un effet d'ombrage sur les courgettes qui n'a pas été particulièrement bénéfique aux plantes sur le long terme. Néanmoins, l'ombre partielle dont elles bénéficiaient lorsque les températures étaient élevées a favorisée leur croissance. Sous la configuration horizontale, côté mi-Est, les laitues et les haricots n'ont pas pu profiter de la pleine lumière de l'après-midi puisqu'ils étaient à l'ombre pendant cette période. Cette situation a négativement impacté leurs rendements.

En ce qui concerne la modalité verticale, par son ombre projetée plus loin, les résultats de la bande Ouest sont quasi meilleurs comparés à la bande Ouest des autres modalités. Le rendement de laitues de cette modalité sur la bande Ouest a augmenté de 31% du témoin. Cette modalité a également permis que les courgettes se développent aussi bien que sur la modalité témoin. Les rendements de courgettes sur la verticale sont respectivement 51,20% et 4,37% plus élevés par rapport aux modalités horizontale et témoin.

Concernant la durabilité environnementale, notre expérimentation a montré, à travers le suivi de l'apport en eau, un aspect positif sur la réduction des besoins en eau notamment pour les courgettes, qui n'ont que très peu été arrosé au cours du cycle.

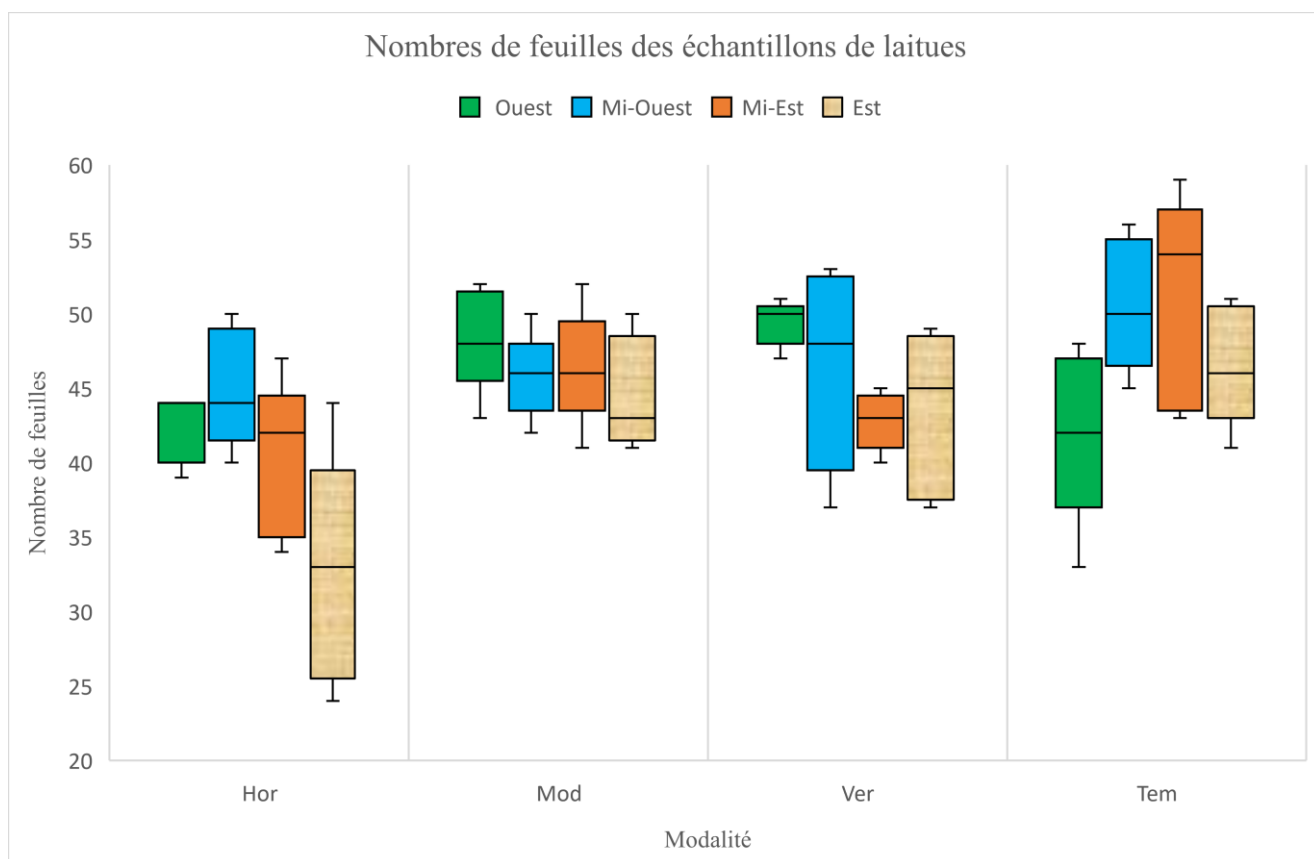
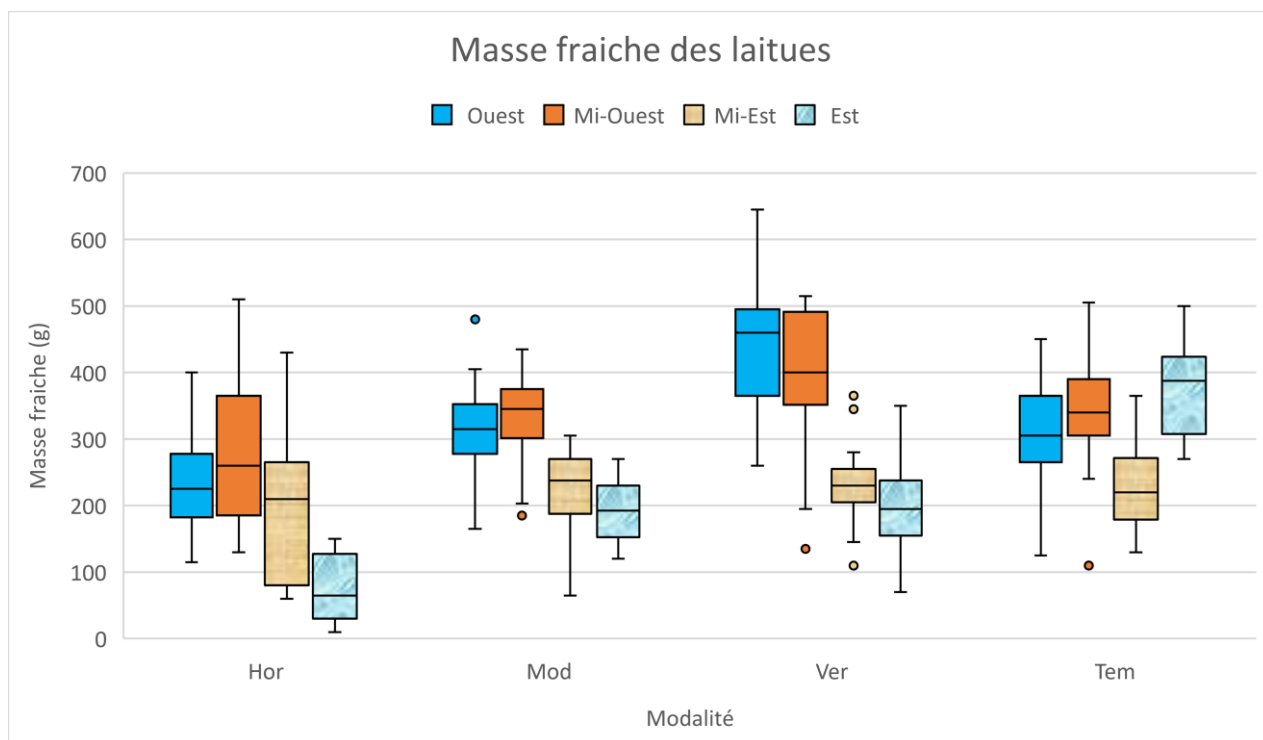
L'étude souligne l'importance d'aller plus loin dans le bilan économique en analysant de manière plus complète les coûts et revenus associés à ce type de système, afin de mettre plus en évidence les avantages de l'agrivoltaïsme.

ANNEXES

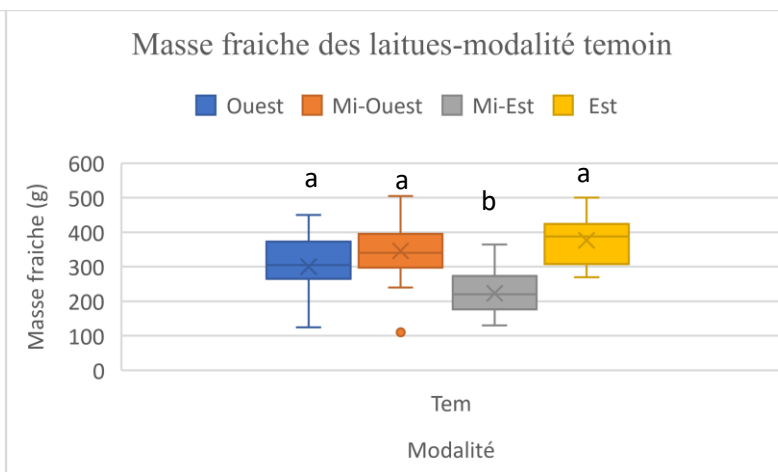
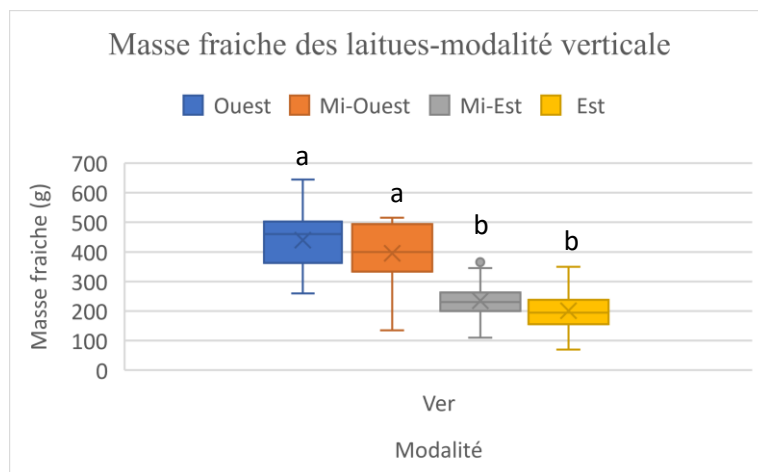
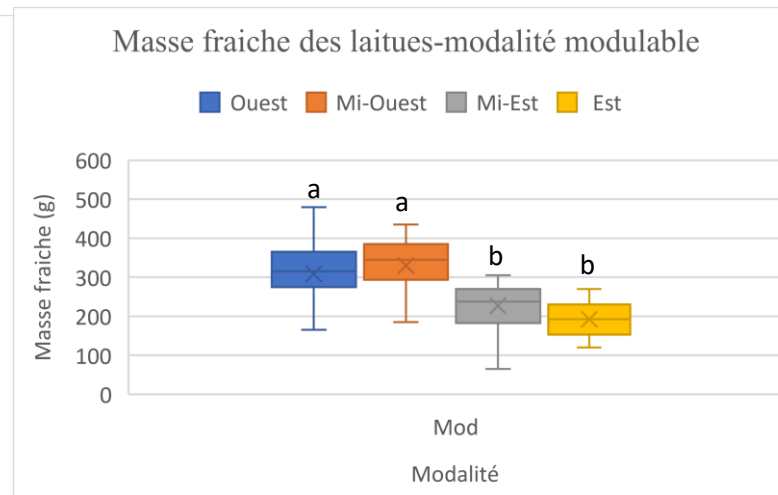
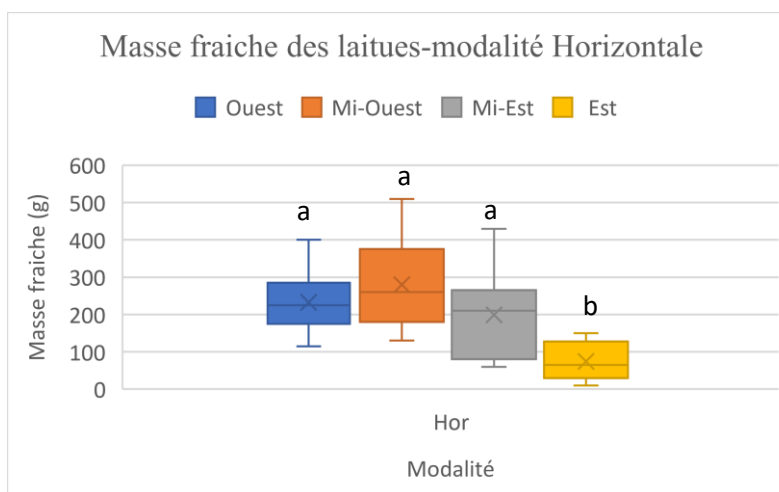
Annexe 1 : Tableau récapitulatif des semis et transplantation

Date de semis	Nombre de plants	Date de mise en pépinière	Date de transplantation	Nombres total transplanté	Lieu de transplantation	Date de récolte	Durée de la culture
10/05/2023	60 courgettes	24/05/2023	06/06/2023	24	Parcelle agroforestière de wasabi	30/06/2023- 20/07/2023	44 jours
16/05/2023	307 godets de haricots	24/05/2023	07/06/2023- 08/06/2023	304		18/07/2023	42 jours
Pris du commerce	450 plants de laitue	Pas de mise en pépinière	08/06/2023	400		11/07/2023	33 jours

Annexe 2 : Box-plots général des données de biomasse fraîche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bandes et des données sur les nombres de feuilles de laitues de chaque bande pour les 4 modalités



Annexe 3 : Box-plots des données de masse fraîche des laitues par modalité avec sous-catégorie les bandes



Annexe 4 : Points de saturation lumineuse de quelques cultures(Sekiyama & Nagashima, 2019)

Cultures	Points de saturation de la lumière (KLX)	Cultures	Points de saturation de la lumière (KLX)
Maïs	80–90	Riz	40–45
Pastèque	80–90	Carotte	40
Tomate	80	Navet	40
Taro	80	Patate douce	30
Concombre	55	Laitue	25
Citrouille	45	Poivron	20–30
Myrtille	45	Ciboule	25
Chou	45	Champignon	>20

Annexe 5 : Prix moyen d'un kilogramme de légumes en agriculture conventionnelle et biologique (prix/pièce pour la laitue et le concombre)(*Observatoire Fruits et Légumes 2022.pdf*, s. d.)

	Agriculture conventionnelle			Agriculture biologique		
	Jun 2021	Jun 2022	Variation en % 22/21	Jun 2021	Jun 2022	Variation en % 22/21
Aubergine violette	2,35	2,64	+12%	4,65	4,39	-6%
Carottes	1,58	1,53	-3%	2,24	2,20	-2%
Concombre	1,04	1,23	+18%	1,82	1,63	-10%
Courgette (longue)	1,69	1,80	+6%	2,89	3,16	+9%
Haricots verts	4,33	5,25	+21%	10,38	8,99	-13%
Laitue (verte)	1,01	1,10	+9%	1,69	1,50	-11%
Oignons	2,62	2,26	-14%	2,98	3,21	+8%
Poivron (vert)	3,30	4,52	+37%	5,58	6,12	+10%
Pomme de terre	1,13	1,33	+18%	2,12	1,99	-6%
Tomate grappe	2,00	2,61	+31%	5,42	5,54	+2%

Annexe 6 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques

www.jinkosolar.com



Tiger Pro 72HC-TV 525-545 Watt

BIFACIAL MODULE WITH
TRANSPARENT BACKSHEET

P-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

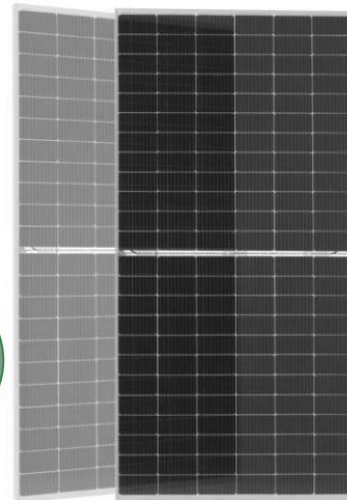
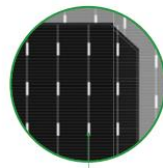
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



Bifacial Technology

Key Features



Multi Busbar Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



Light-weight design

Light-weight design using transparent backsheet for easy installation and low BOS cost.



Higher Power Output

Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.



Longer Life-time Power Yield

0.45% annual power degradation and 30 year linear power warranty.



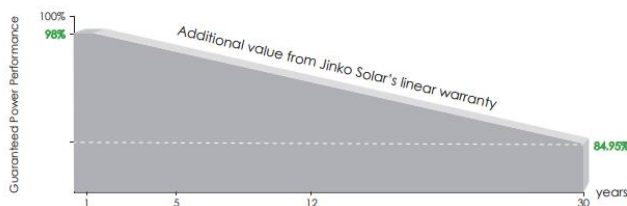
Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



POSITIVE QUALITY™
Continual Quality Assurance

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

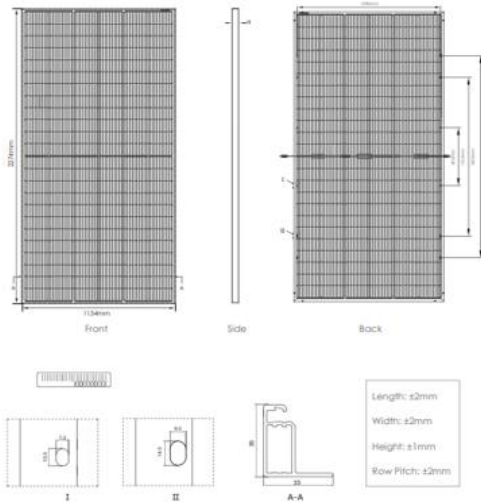


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.45% Annual Degradation Over 30 years

Engineering Drawings

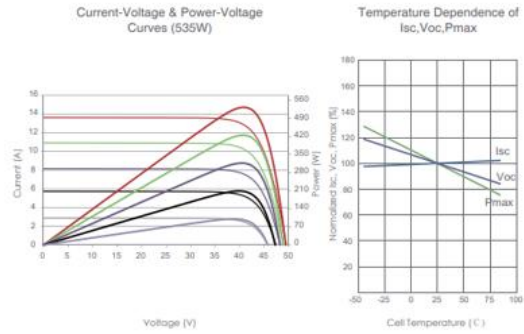


Packaging Configuration

[Two pallets = One stack]

31 pcs/pallets, 62 pcs/stack, 620 pcs/ 40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	144 [6×24]
Dimensions	2274×1134×35mm (89.53×44.65×1.38 inch)
Weight	28.9 kg (63.7 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM525M-72HL4-TV		JKM530M-72HL4-TV		JKM535M-72HL4-TV		JKM540M-72HL4-TV		JKM545M-72HL4-TV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.61V	37.74V	40.71V	37.88V	40.81V	37.98V	40.91V	38.08V	41.07V	38.18V
Maximum Power Current (Imp)	12.93A	10.35A	13.02A	10.41A	13.11A	10.48A	13.20A	10.55A	13.27A	10.62A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.27V	46.50V	49.35V	46.58V	49.42V	46.65V	49.49V	46.71V	49.65V	46.86V
Short-circuit Current (Isc)	13.64A	11.02A	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.87A	11.20A	13.94A	11.26A
Module Efficiency STC (%)	20.36%		20.55%		20.75%		20.94%		21.13%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		JKM525M-72HL4-TV	JKM530M-72HL4-TV	JKM535M-72HL4-TV	JKM540M-72HL4-TV	JKM545M-72HL4-TV
5%	Maximum Power (Pmax)	551Wp	557Wp	562Wp	567Wp	572Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.38%	21.58%	21.78%	21.99%	22.19%
15%	Maximum Power (Pmax)	604Wp	610Wp	615Wp	621Wp	623Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.41%	23.64%	23.86%	24.08%	24.30%
25%	Maximum Power (Pmax)	656Wp	663Wp	669Wp	675Wp	681Wp
	Module Efficiency STC (%)	25.45%	25.69%	25.93%	26.18%	26.42%

*STC: Irradiance 1000W/m² Cell Temperature 25°C AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m² Ambient Temperature 20°C AM=1.5 Wind Speed 1m/s

©2020 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.
 Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN

BIBLIOGRAPHIES

ADEME, I Care & Consult, Ceresco, Cétiac. (2021a). Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme-Etat de l'art bibliographique. 141p. Consulté le 10 avril 2023 et téléchargeable à <https://librairie.ademe.fr/>

ADEME, I Care & Consult, Ceresco, Cétiac. (2021b). Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme-Résumé exécutif de l'étude. 28p. Consulté le 10 avril 2023 et téléchargeable <https://librairie.ademe.fr/>

Ai., Leon, et Keiichi N., Ishihara. (2018). Influence of allocation methods on the LC-CO2 emission of an agrivoltaic system, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 138. p110-117.

AIE Solar PV – Analysis. (2022). Consulté 5 avril 2023, à l'adresse <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Agromet.be. (s. d.). Consulté 15 août 2023, à l'adresse <https://agromet.be/fr/pages/home/>

Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545-561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>

Aman, M. M., Solangi, K. H., Hossain, M. S., Badarudin, A., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., Bakar, A. H. A., & Kazi, S. N. (2015). A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1190-1204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086>

Barron-Gafford, G., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L., Barnett-Moreno, I., Blackett, D., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A., Nabhan, G., & Macknick, J. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>

Brohm, R., & Nguyen, Q. K. (2018). *Dual-Use Approaches for Solar Energy and Food Production International Experience and Potentials for Viet Nam*. Docslib. <https://docslib.org/doc/4394010/dual-use-approaches-for-solar-energy-and-food-production-international-experience-and-potentials-for-viet-nam>

Campana, P. E., Olsson, A., Li, H., & Yan, J. (2016). An economic analysis of photovoltaic water pumping irrigation systems. *International Journal of Green Energy*, 13(8), 831-839. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1161631>

Catalogue-semaille-2023.pdf. (s. d.). Consulté 13 avril 2023, à l'adresse <https://www.semaille.com/public/catalogue-semaille-2023>

Cho, J., Park, S. M., Park, A. R., Lee, O. C., Nam, G., & Ra, I.-H. (2020). Application of Photovoltaic Systems for Agriculture : A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture. *Energies*, 13(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/en13184815>

Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use : Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725-2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>

Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., & Belaud, G. (2018). *Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots*. 22(2), 1285-1298. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>

Fiche-culture_haricot.pdf. (s. d.). Consulté 13 avril 2023, à l'adresse https://comifer.asso.fr/images/pdf/Fiches_cultures/fiche-culture_haricot.pdf

GAB/FRAB. (2009). Fruits et légumes. *Fiche n°13*. Consulté 13 avril 2023, à l'adresse https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2021/12/Web_13-COURGETTE.pdf

Gepts, P. (2001). *Phaseolus vulgaris* (Beans). In *Encyclopedia of Genetics* (p. 1444-1445). <https://doi.org/10.1006/rwgn.2001.1749>

Grembombo, A. (s.d). Notes techniques sur le maraîchage a l'usage des écoles. Consulté le 09 mai 2023 à <https://doi.org/10.2307/1523706>

Harinarayana, T., & Vasavi, K. S. V. (2014). Solar Energy Generation Using Agriculture Cultivated Lands. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014. <https://doi.org/10.4236/sgre.2014.52004>

Harvey, M., & Pilgrim, S. (2011). The new competition for land : Food, energy, and climate change. *Food Policy*, 36, S40-S51. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.009>

INERA. (2020). *Global Renewables Outlook : Energy Transformation 2050*.

Kroll, R., (1994). Les cultures maraichères. Livre p103-134.

Kuemmel, B., Langer, V., Magid, J., De Neergaard, A., & Porter, J. R. (1998). Energetic, economic and ecological balances of a combined food and energy system. *Biomass and Bioenergy*, 15(4-5), 407-416. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00047-6)

Le prix de l'eau en Belgique. (s. d.). SWDE. Consulté 06 août 2023, à l'adresse <https://www.swde.be/fr/le-prix-de-leau-en-belgique>

Majumdar, D., & Pasqualetti, M. J. (2018). Dual use of agricultural land : Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape and Urban Planning*, 170, 150-168. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011>

Malu, P. R., Sharma, U. S., & Pearce, J. M. (2017). Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.004>

Mamun, M. A. A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., & Aziz, A. A. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>

Mappa, D. (2010). *Les productions légumières : Cahier d'activités*. Educagri Editions.

Marrou H, Dufour L, Wery J (2013a) How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *Eur J Agron* 50:38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>

Marrou H, Guilioni L, Dufour L, Dupraz C, Wery J (2013b) Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agric For Meteorol* 177:117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>

Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013c). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>

Ministère de l'agriculture, de la forêt et de la pêche. (s. d.). Production d'énergie solaire de type agricole : Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/einou.html>

Navarrete, M., & Le Bail, M. (2007). SALADPLAN : A model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(3), 209-221. <https://doi.org/10.1051/agro:2007009>

Nonhebel, S. (2005). Renewable energy and food supply : Will there be enough land? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(2), 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.02.003>

Observatoire Fruits et Légumes. (2022). Consulté 5 août 2023, à l'adresse https://www.famillesrurales.org/sites/multisite.famillesrurales.org/_www/files/ckeditor/actualites/fichiers/Observatoire%20Fruits%20et%20L%3%A9gumes%202022.pdf

Patel, B., Gami, B., Baria, V., Patel, A., & Patel, P. (2018). Co-Generation of Solar Electricity and Agriculture Produce by Photovoltaic and Photosynthesis—Dual Model by Abellon, India. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141(3). <https://doi.org/10.1115/1.4041899>

Polese, J.-M. (2006). *La culture des haricots et des pois*. Editions Artemis.

RADHORT. (2012). La culture du haricot nain au Sénégal. 40p

Riaz, M.H., Imran, H., Younas, R., & Butt, N.Z. (2021). The optimization of vertical bifacial photovoltaic farms for efficient agrivoltaic systems.

Salaires mensuels bruts moyens | Statbel. (2022). Consulté 6 août 2023, à l'adresse <https://statbel.fgov.be/fr/themes/emploi-formation/salaires-et-cout-de-la-main-doeuvre/salaires-mensuels-bruts-moyens>

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Tabea, O., Bopp, G., Reise, C., & Braun, C. (2020). *Implementation of agrophotovoltaics_ Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications / Elsevier Enhanced Reader*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>

Scognamiglio, A., Garde, F., Ratsimba, T., Monnier, A., & Scotto, E. (2014). *Photovoltaic greenhouses: a feasible solutions for islands?*

Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production : Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments*, 6(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/environments6060065>

Sidibé., S, Tangara., T et Shinohara., T. (2012). Fiche technique. *Stabulation des petits ruminants*. 16p.

Suamme, O. (2012). La courgette de plein champ, *Éléments techniques et économiques pour les zones de montagne sèche du Languedoc-Roussillon*.

Tajima, M., & Iida, T. (2021). *Evolution of agrivoltaic farms in Japan*. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0054674>

Talbot, G. (2011). *L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : Une clef pour en comprendre la productivité ?* [Phdthesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc]. <https://theses.hal.science/tel-00664530>

Trommsdorff, M., Kang, J ., Reise, C., Schindele, S ., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Hög, P., & Obergefell, T. (2021). Combining food and energy production : Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Hög, P. (2019). Agrophotovoltaic systems : Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). Combining photovoltaic modules and food crops : First agrovoltaic prototype in Belgium. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 18. <https://lirias.kuleuven.be/3183062>

Xiao, Y., Zhang, H., Pan, S., Wang, Q., He, J., & Jia, X. (2022). *An agrivoltaic park enhancing ecological, economic and social benefits on degraded land in Jiangshan, China*. 020002. <https://doi.org/10.1063/5.0106454>

