

Étude des performances agronomiques de la laitue (*Lactuca sativa* L., var. Amaroza) cultivée en système agrivoltaïque sous serre et en extérieur.

Auteur : Lecat, Solenn

Promoteur(s) : Jijakli, Haissam; Libault, Arthur

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24302>

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.

Étude des performances agronomiques de la laitue
(*Lactuca sativa* L., var. Amaroza) cultivée en système
agrivoltaïque sous serre et en extérieur

SOLENN LECAT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

(CO)-PROMOTEUR(S) : PR. HAÏSSAM JIJAKLI ET ARTHUR LIBAULT

"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 ACADÉMIQUE¹ DE GEMBLOUX AGRO-BIO TECH."

"LE PRÉSENT DOCUMENT N'ENGAGE QUE SON AUTEUR."

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs, membres du personnel enseignant de GxABT.

Étude des performances agronomiques de la laitue
(*Lactuca sativa* L., var. Amaroza) cultivée en système
agrivoltaïque sous serre et en extérieur

SOLENN LECAT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

(CO)-PROMOTEUR(S) : PR. HAÏSSAM JIJAKLI ET ARTHUR LIBAULT

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier Pr. Jijakli, dont le cours de Master 2 sur l'agriculture urbaine a profondément influencé mon parcours. C'est grâce à lui que j'ai fini par changer complètement d'orientation, moi qui m'étais initialement spécialisée en Forêt.

Un immense merci à Arthur Libault, mon co-promoteur, pour son incroyable encadrement. Merci d'avoir écouté mes idées, même les plus farfelues, toujours avec le sourire, et parfois de leur avoir laissé une chance. Merci aussi de m'avoir fait redescendre sur Terre quand il le fallait pour éviter que je ne me lance dans un projet de 4 ans au lieu de 6 mois.

Merci aux techniciens Sam, Aymeric et Hadrien : sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible. Merci également à Jimmy Bin et Sébastien Franceschini pour leurs conseils techniques précieux sur les logiciels de scan et les statistiques.

Merci à Arthur, Solène, Mohamed, Olivier, Maylis, et aux maraîchers pour leur aide précieuse, que ce soit lors des séances interminables de scan des laitues ou durant la récolte, tout aussi interminable.

Merci à Seb de m'avoir transmis sa passion du maraîchage, avec enthousiasme et générosité.

Merci à ma famille :

À Antoine, que je considérerai toujours comme un membre de ma famille, pour ton soutien sans faille pendant ces six années d'études, y compris dans les moments les plus sombres.

À Hugues, Pauline et Anouchka, qui ont été des alliés inestimables dans mon parcours scolaire, mais aussi dans la vie. Sans vous, je ne serais probablement jamais arrivée jusqu'ici.

À Morgan, un grand frère formidable, qui m'a suivie dans toutes mes crises de folie en période d'examens.

À mes parents, pour m'avoir encouragée à poursuivre, encore et encore, même quand, tous les trois mois, je voulais tout plaquer pour aller élever des chèvres dans le Périgord, devenir pompière, caissière, maraîchère ou sage-femme.

À Lucien, pour le regard que tu poses sur l'avenir.

Et enfin... ce n'est pas courant dans un mémoire, mais je tiens à ne pas remercier une grande partie du corps professoral qui m'a suivie tout au long de mon parcours. Peu ont cru en ma réussite, beaucoup m'ont jugée uniquement sur mon orthographe. On m'avait dit que je ne réussirais pas mes primaires, et aujourd'hui, je termine un master. J'en ai bavé. J'ai dû travailler quatre fois plus que les autres. Mais j'ai réussi.

Et maintenant, je sais.

Je sais que la réussite scolaire ne définit en rien l'intelligence d'une personne.

Et je suis convaincue que si l'université formait réellement des esprits intelligents... le monde serait bien différent.

Résumé

Face aux enjeux croissants liés à l'augmentation de la population mondiale, au changement climatique et à la raréfaction des ressources, l'agrivoltaïsme, qui associe cultures et production d'énergie grâce à des panneaux photovoltaïques, apparaît comme une solution innovante pour relever ces défis.

Cette étude évalue l'impact des panneaux photovoltaïques sur le rendement agronomique de la laitue (*Lactuca sativa* L., variété Batavia Amaroza) en comparant plusieurs modalités de culture, avec ou sans panneaux, en serre ou en extérieur. Les paramètres agronomiques mesurés comprennent le poids frais, le pourcentage de poids sec, le nombre de feuilles et l'indice de surface foliaire. Par ailleurs, la disponibilité lumineuse, l'efficacité d'utilisation du rayonnement et la production électrique des panneaux ont également été suivies.

Les résultats montrent que la présence de panneaux photovoltaïques ne réduit pas significativement la biomasse fraîche des laitues, et peut même l'améliorer dans certaines configurations, notamment en serre avec une couverture de 33 % de panneaux, ainsi qu'en extérieur à l'ouest des panneaux. Le pourcentage de biomasse sèche est plus élevé pour les modalités situées à l'est des panneaux en extérieur et en serre plastique. En revanche, le nombre de feuilles est peu affecté, tant en serre qu'en extérieur. L'indice de surface foliaire présente des tendances similaires à celles de la biomasse fraîche.

La production électrique est comparable entre les panneaux inclinés à 45 ° vers l'ouest et ceux en position verticale, tandis qu'une baisse est observée en position horizontale, probablement liée à l'accumulation de salissures. On observe une meilleure utilisation de la lumière disponible sous serre photovoltaïque, ce qui permet un rendement semblable aux autres modalités plus ensoleillées.

Bien que limitée à une seule année d'expérimentation, cette étude suggère que l'agrivoltaïsme permet de concilier production agricole et production énergétique, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses.

Abstract

Faced with the growing challenges of global population increase, climate change, and resource scarcity, agrivoltaics, combining crop cultivation with energy production through photovoltaic panels, emerges as an innovative solution to address these issues.

This study assesses the impact of photovoltaic panels on the agronomic yield of lettuce (*Lactuca sativa* L., Batavia Amaroza variety) by comparing several cultivation systems, either with or without panels, in greenhouses or in open-field conditions. The measured agronomic parameters include fresh weight, dry matter percentage, leaf number, and leaf area index. In addition, light availability, radiation use efficiency, and the electrical output of the panels were monitored.

The results indicate that the presence of photovoltaic panels does not significantly reduce lettuce fresh biomass, and may even enhance it in certain configurations, particularly in greenhouses with 33 % panel coverage and in open-field conditions west of the panels. The percentage of dry biomass is higher in treatments located east of the panels, both outdoors and in plastic-covered greenhouses. In contrast, leaf number is only marginally affected, regardless of the cultivation setting. The leaf area index exhibits trends similar to those observed for fresh biomass.

Electrical production is comparable between panels tilted at 45 ° towards the west and those positioned vertically, while a decrease is observed in horizontally oriented panels, likely due to the accumulation of debris. Radiation use efficiency is higher in photovoltaic greenhouses, enabling yields comparable to other systems despite reduced light availability.

Although limited to a single year of experimentation, this study suggests that agrivoltaics can reconcile agricultural production with energy generation, thereby offering promising prospects.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. État de l'art.....	2
2.1. Laitue.....	2
2.1.1. Choix de la laitue.....	2
2.1.2. Choix variétal.....	3
2.1.3. Exigences de la laitue.....	4
2.2. Panneaux photovoltaïques bifaciaux.....	5
2.2.1. Principe des panneaux bifaciaux.....	5
2.2.2. Importance des panneaux photovoltaïques.....	6
2.2.3. Facteurs influençant la production d'électricité des panneaux bifaciaux.....	6
2.3. Système agrivoltaïsme.....	9
2.3.1. Principe de l'agrivoltaïsme.....	9
2.3.2. Importance de l'agrivoltaïsme.....	9
2.3.3. Avantages de l'agrivoltaïsme.....	10
2.3.4. Inconvénients de l'agrivoltaïsme.....	10
2.3.5. La laitue en agrivoltaïsme.....	12
2.3.5.1. Besoin en lumière des laitues.....	12
2.3.5.2. Impact des PV sur les laitues.....	13
2.4. Indices fréquemment utilisés.....	14
2.4.1. Le ratio d'équivalent-terre (LER).....	14
2.4.2. L'indice de surface foliaire (LAI).....	14
2.4.3. Efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE).....	14
3. Matériel et méthode.....	16
3.1. Localisation.....	16
3.2. Dispositifs expérimentaux.....	16
3.2.1. Culture en serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	17
3.2.2. Culture en serre plastique (GH).....	19
3.2.3. Culture extérieure avec panneaux photovoltaïque (OF_PV).....	21
3.2.4. Culture extérieure (OF).....	23
3.3. Pratiques maraîchères générales.....	24
3.4. Données abiotiques.....	25
3.5. Variables et indices étudiées.....	25
3.6. Récolte des données biotiques.....	26
3.7. Traitements des données.....	27
3.7.1. Analyses.....	27
3.7.2. Contrôle de la qualité des données et tests statistiques.....	28
4. Résultats.....	29
4.1. Rendement agronomique.....	29
4.1.1. Dispositif sous serre (GH et GH_PV).....	29
4.1.1.1. Biomasses.....	29
4.1.1.2. Nombre de feuilles.....	30

4.1.1.3. L'indice de surface foliaire (LAI).....	30
4.1.2. Dispositif de culture extérieure (OF et OF_PV).....	31
4.1.2.1. Biomasses.....	31
4.1.2.2. Nombre de feuilles.....	33
4.1.2.3. Indice de surface foliaire (LAI).....	34
4.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	35
4.2. Production d'électricité.....	36
4.3. Disponibilité lumineuse.....	38
4.4. Données abiotiques.....	42
4.4.1. Capteurs de température, d'humidité et compteur d'eau.....	42
4.4.2. Analyse du sol.....	42
4.5. Efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE).....	43
4.6. Corrélations au taux d'ombrage.....	44
5. Discussion.....	45
5.1. Rendement agronomique.....	45
5.1.1. Dispositif sous serre (GH et GH_PV).....	45
5.1.1.1. Critiques.....	45
5.1.1.2. Discussion des résultats.....	46
5.1.1.3. Conclusion.....	47
5.1.2. Dispositif de culture extérieure (OF et OF_PV).....	48
5.1.2.1. Critiques.....	48
5.1.2.2. Discussion des résultats.....	48
5.1.2.3. Conclusion.....	50
5.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	51
5.2. Production d'électricité.....	51
5.3. Disponibilité lumineuse.....	52
5.4. Données abiotiques.....	53
5.5. Efficacité d'utilisation du rayonnement.....	53
6. Conclusion et perspective.....	54
6.1. Conclusion.....	54
6.2. Perspectives.....	55
7. Description de la contribution personnelle de l'étudiante.....	57
8. Bibliographie.....	58
9. Annexes.....	66

Abréviations

ANOVA : Analyse de la variance (Analysis of variance)
%Bs : Pourcentage de biomasse sèche
Bf : Biomasse fraîche
DLI : Intégrale de lumière journalière (Daily light integral)
E : Production d'électricité
GH : Culture en serre plastique
GH_PV : Culture en serre avec panneaux photovoltaïques
GH_33 : Culture en serre avec 33 % de couverture de panneaux photovoltaïques
GH_50 : Culture en serre avec 50 % de couverture de panneaux photovoltaïques
LAI : Indice de surface foliaire (Leaf area index)
LER : Ratio d'équivalent-terre (Land Equivalent Ratio)
NbF : Nombre de feuilles
OF : Culture extérieure
OF_PV : Culture extérieure avec panneaux photovoltaïques
OF_E1 : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques et sur la première ligne de culture
OF_E2 : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques et sur la deuxième ligne de culture
OF_W1 : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques et sur la première ligne de culture
OF_W2 : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques et sur la deuxième ligne de culture
OF_0E1 ou **0E1** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 ° et sur la première ligne de culture.
OF_0E2 ou **0E2** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 ° et sur la deuxième ligne de culture.
OF_0W1 ou **0W1** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 ° et sur la première ligne de culture.
OF_0W2 ou **0W2** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 ° et sur la deuxième ligne de culture.
OF_45E1 ou **45E1** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 45 ° et sur la première ligne de culture.
OF_45E2 ou **45E2** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 45 ° et sur la deuxième ligne de culture.
OF_45W1 ou **45W1** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 45 ° et sur la première ligne de culture.
OF_45W2 ou **45W2** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 45 ° et sur la deuxième ligne de culture.
OF_90E1 ou **90E1** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 90 ° et sur la première ligne de culture.
OF_90E2 ou **90E2** : Culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques inclinés à 90 ° et sur la deuxième ligne de culture.
OF_90W1 ou **90W1** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 90° et sur la première ligne de culture.
OF_90W2 ou **90W2** : Culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques inclinés à 90 ° et sur la deuxième ligne de culture.
PAR : Rayonnement photosynthétiquement actif
PPFD : Densité de flux photonique photosynthétique (Photosynthetic Photon Flux Density)
PV : Panneaux photovoltaïques
RUE : Efficacité d'utilisation du rayonnement (Radiation Use Efficiency)
WASABI : Plateforme Wallonne de Systèmes innovants en Agriculture et Biodiversité urbaine

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des exigences de la laitue Amaroza (<i>Lactuca sativa</i> L., 1753). Source : (Agrosemens, s. d.; Tisserand 2023; Verolet et al. 2000; Al-Said et al. 2018).....	4
Tableau 2 : Liste des variables utiles pour calculer le RUE, avec leurs symboles, unités et utilités.....	15
Tableau 3 : Liste des variables étudiées, avec leurs symboles et unités.....	25
Tableau 4 : Moyennes du nombre de feuilles par plant de laitue et et leur intervalle de confiance à 95 % cultivées sous serre en fonction du taux de couverture des panneaux solaires.....	30
Tableau 5 : Production d'électricité moyenne par jour et par panneau solaire sur toute la durée de production des laitues (08/05 au 20/06). Les modalités sont définies comme suit : OF_0, des panneaux solaires en position horizontale; OF_45, des panneaux solaires inclinés à 45 ° vers l'ouest et OF_90, des panneaux solaires en position verticale orientée est-ouest.....	36
Tableau 6 : Liste des données de luminosité disponibles pour l'analyse de la disponibilité lumineuse.....	38
Tableau 7 : Comparaison de la période de temps d'ombrage et du pourcentage d'ombrage par jour déterminée à l'aide du modèle 3D et des capteurs WASABI. Les cases vertes indiquent une concordance entre le modèle 3D et les capteurs WASABI, tandis que les cases rouges signalent des divergences.....	39
Tableau 8 : Résultat de l'analyse de sol effectuée le 01/05/25 par HEPH Condorcet sur la plateforme WASABI sur 3 dispositifs expérimentaux.....	42

Table des figures

Figure 1 : Représentation schématique de la structure et du fonctionnement des panneaux photovoltaïques bifaciaux. Source : Fabrégat 2021.....	5
Figure 2 : Représentation schématique de la production d'électricité journalière de panneaux solaires bifaciaux orientés vers le sud (rouge) et en position verticale orientée est-ouest (vert). Source : Solenn Lecat.....	7
Figure 3 : Irradiance arrière relative pour le module central de panneaux photovoltaïques d'une rangée en fonction du nombre de modules dans la rangée. 100 % représente l'irradiance la plus faible au centre d'une longue rangée de modules. Source : (Stein et al. 2021).....	8
Figure 4 : Photo vue du ciel de la plateforme WASABI avec les quatre dispositifs expérimentaux : culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV), culture extérieure (OF), culture en serre plastique (GH) et culture en serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV), respectivement en mauve, orange, vert et bleu. Source : Arthur Libault.....	16
Figure 5 : Photo de l'intérieur de la serre avec panneaux photovoltaïques de la plateforme WASABI. Au premier plan, la modalité 33 %, et à l'arrière-plan, la modalité 50 %. Source : Arthur Libault.....	17
Figure 6 : Représentation schématique, vue du haut, de la serre avec panneaux solaires, installée sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.....	18
Figure 7 : Photo de l'intérieur de la serre plastique de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault.....	19
Figure 8 : Représentation schématique, vue du haut, de la serre plastique, installée sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.....	20
Figure 9 : Photo aérienne du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV) de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault.....	21
Figure 10 : (a) Représentation schématique sur image aérienne, des trois facteurs composant le dispositif expérimental de culture en extérieur avec panneaux photovoltaïques sur la plateforme WASABI. (b) Représentation en arborescence des 12 modalités du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.....	21
Figure 11 : Représentation schématique, vue du ciel, du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques présente sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.....	22
Figure 12 : Photo aérienne du dispositif culture extérieure (OF) de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault.....	23
Figure 13 : Représentation schématique, vue du haut, de la parcelle culture en extérieur, installée sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.....	23
Figure 14 : (a) Répartition de la biomasse fraîche (g) et (b) du pourcentage de biomasse sèche (%) des laitues cultivées sous serre selon le taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %). Les lettres au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).....	29
Figure 15 : Répartition de l'indice de surface foliaire (LAI) des laitues cultivées sous serre, en fonction du taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %). Les lettres au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).....	30
Figure 16 : Les graphiques (1a) et (2a) illustrent l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0 °, 45 ° et 90 °), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur la biomasse fraîche (Bf) et le pourcentage de biomasse sèche (%Bs) des laitues. Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Les graphiques (1b) et (2b) présentent les différences de rendement pour la biomasse fraîche (Bf) et le pourcentage de biomasse sèche (%Bs) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), tels qu'estimées par le test de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.....	32
Figure 17 : Le graphique (a) illustre l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0 °, 45 ° et 90 °), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur le nombre de feuilles des laitues (NbF). Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Le graphique (b) présente les différences de nombre de feuilles (NbF) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), telles qu'estimées par le test de Dunnett (α	

= 0,05). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.....	33
Figure 18 : Le graphique (a) illustre l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0 °, 45 ° et 90 °), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur l'indice de surface foliaire (LAI) des laitues. Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Le graphique (b) présente les différences de l'indice de surface foliaire (LAI) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), telles qu'estimées par le test de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.....	34
Figure 19 : Analyse en composantes principales réalisée à partir des variables : biomasse fraîche (Bf), pourcentage de biomasse sèche (%Bs), nombre de feuilles (NbF) et l'indice de surface foliaire (LAI). Les flèches bleues indiquent la contribution des variables aux deux premières dimensions principales (Dim1 et Dim2). Les points représentent les individus, colorés selon leur modalité de culture. Les points de plus grande taille correspondent à la moyenne de chaque modalité.....	35
Figure 20 : Distribution journalière de la production d'électricité pour les inclinaisons (a) 0 °, (b) 45 ° vers l'ouest et (c) 90 ° orientée est-ouest, lors d'une journée entièrement ensoleillée (11 juin). Pour le graphique (a), les données temporelles présentent un décalage de deux heures : les valeurs indiquées à 10 h correspondent en réalité à celles mesurées à 8 h.....	37
Figure 21 : Comparaison de la luminosité normalisée mesurée par les capteurs de WASABI (courbe bleue) et celle fournie par la station météo (courbe rouge) au cours de la journée. La zone verte indique la période d'ombrage estimée par le modèle 3D, tandis que la zone grise correspond à l'ombrage effectivement détecté par les capteurs.....	40
Figure 22 : Pourcentage d'ombrage (barres vertes, axe de gauche) et l'intégrale de lumière journalière (DLI) (barres orange, axe de droite) pour chacune des modalités expérimentales.....	41
Figure 23 : Effet des modalités sur le Radiation Use Efficiency (RUE). Les modalités sont GH, GH_33, GH_50 pour les cultures sous serre, avec 0 %, 33 % ou 50 % de couverture photovoltaïque. OF pour cultures en extérieur, avec des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 °, 45 ° ou 90 °, placés à l'est (E) ou à l'ouest (W), sur deux lignes de culture (1 = proche des panneaux, 2 = plus éloignée). Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).....	43
Figure 24 : Droites de régression établies entre le DLI moyen et la biomasse fraîche (1a et 1b), ainsi que le nombre de feuilles (2a et 2b). Les points verts correspondent aux trois modalités sous serre, tandis que les points bleus représentent les modalités en culture extérieure.....	44

Table des annexes

Annexe 1 : Fiche technique des polycarbonates semi-transparents et transparents utilisés pour la construction de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	66
Annexe 2 : Plan technique de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	68
Annexe 3 : Fiche technique des ventilateurs de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	69
Annexe 4 : Fiche technique des volets d'aération de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	75
Annexe 5 : Fiche technique des tuyaux microporeux utilisés pour l'ensemble des dispositifs de culture de la plateforme WASABI.....	77
Annexe 6 : Fiche technique des PV de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	78
Annexe 7 : Cartographie des zones correspondant aux modalités 33 % et 50 % de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).....	80
Annexe 8 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques du dispositif de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV).....	81
Annexe 9 : Modélisation 3D du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV).....	83
Annexe 10 : Fiche technique du calcaire vert DCM.....	84
Annexe 11 : Fiche technique des granulés anti-limaces.....	85
Annexe 12 : Description des capteurs et des modules de mesure des paramètres abiotiques présents sur la plateforme WASABI.....	92
Annexe 13 : Fiche technique de la balance Kern.....	94
Annexe 14 : Relation allométrique entre les dimensions (longueur et largeur) de huit feuilles de laitue Amaroza et le LAI.....	96
Annexe 15 : Fiche technique de l'étuve Memmert.....	98
Annexe 16 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_Bf.....	102
Annexe 17 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_%Bs.....	103
Annexe 18 : Tableau des moyennes de biomasse fraîche (Bf), de pourcentage de biomasse sèche (%Bs), de nombre de feuilles (NbF) et d'indice de surface foliaire (LAI), avec leur intervalle de confiance à 95 %, pour chaque modalité de couverture de panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %) dans la serre GH_PV.....	104
Annexe 19 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_NbF.....	105
Annexe 20 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_LAI.....	106
Annexe 21 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_BF.....	107
Annexe 22 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_%Bs.....	108
Annexe 23 : Tableau des moyennes de biomasse fraîche (Bf), pourcentage de biomasse sèche (%Bs), nombre de feuilles (NbF) et indice de surface foliaire (LAI), avec leur intervalle de confiance à 95 %, pour chaque modalité du dispositif de culture en extérieur avec panneaux photovoltaïques (OF_PV).....	109
Annexe 24 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour NbF.....	110
Annexe 25 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_LAI.....	111
Annexe 26 : Valeurs explicatives en pourcentage des dimensions de l'ACP.....	112
Annexe 27 : Comparaison de la luminosité normalisée mesurée par les capteurs de la plateforme WASABI (courbe bleue) et celle fournie par la station météo (courbe rouge) au cours de la journée. La zone verte représente la période d'ombrage estimée par le modèle 3D, tandis que la zone grise correspond à l'ombrage effectivement détecté par les capteurs.....	113
Annexe 28 : Valeurs chiffrées du pourcentage d'ombrage et du DLI (Daily Light Integral) pour chaque modalité de cette étude.....	115
Annexe 29 : Analyse de sols.....	116
Annexe 30 : Conditions d'application de l'ANOVA RUE.....	118
Annexe 31 : Photo aérienne du dispositif OF_PV.....	119

1. Introduction

Selon un rapport publié en 2024 par le Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, la population mondiale pourrait atteindre 9,6 milliards d'habitants en 2050 et environ 10,2 milliards en 2100. Une telle croissance exercera une pression considérable sur les systèmes mondiaux, notamment en termes d'accès aux terres cultivables et de satisfaction de la demande énergétique.

Or, les capacités agricoles sont déjà fragilisées. D'après la FAO (Food and Agriculture Organization of the UN), la quantité de terres arables disponibles par habitant a drastiquement diminué depuis 1961. Les principales causes sont liées à l'urbanisation et à l'agriculture intensive : perte de fertilité des sols, pollutions aux métaux lourds, pollutions par les pesticides et les hydrocarbures, ou conversion des terres vers des cultures non alimentaires.

Parallèlement, la demande énergétique mondiale ne cesse de croître. Entre 2000 et 2023, la consommation d'électricité a presque doublé, passant de 15 277 TWh à 29 471 TWh (IEA, s. d.). Cette tendance se déroule dans un contexte où les énergies fossiles approchent de leur épuisement : les estimations suggèrent une durabilité d'environ quatre décennies, soit une échéance située autour de 2060-2070 (Frumkin et al. 2009). De plus, leur utilisation constitue l'un des principaux moteurs du réchauffement climatique (Lelieveld et al. 2019), aggravant ainsi les défis environnementaux mondiaux.

Dans ce contexte complexe, l'agrivoltaïsme apparaît comme une solution prometteuse. Cette approche permet une double utilisation du sol, en associant production agricole et production d'électricité renouvelable sur une même surface (Libr. ADEME, s. d.). Bien que ses premières expérimentations remontent au début des années 2000 (Zainol Abidin et al. 2021), l'agrivoltaïsme reste un domaine émergent dans lequel de nombreuses questions scientifiques demeurent ouvertes, notamment sur l'optimisation des systèmes et leurs impacts agronomiques et énergétiques. Les recherches menées à ce jour se concentrent principalement aux États-Unis, en Allemagne et en Chine, tandis que peu d'études ont encore été réalisées en Belgique.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. L'étude vise à évaluer, à la fois, le rendement agricole de laitues (*Lactuca sativa* L., variété Batavia *Amaroza*) et la production d'électricité dans deux dispositifs agrivoltaïques : l'un en serre équipée de panneaux photovoltaïques (PV) et l'autre en extérieur sous PV. Ces résultats seront comparés à ceux obtenus dans des modalités témoins, afin de mieux comprendre le potentiel de l'agrivoltaïsme.

2. État de l’art

2.1. Laitue

2.1.1. Choix de la laitue

La laitue (*Lactuca sativa* L., 1753) a été retenue pour cette étude en raison de son importance à la fois dans l’alimentation et dans la recherche scientifique. Selon Sharma et al. 2014, elle figure parmi les légumes les plus consommés à travers le monde, et ce dans la plupart des groupes ethniques. En Belgique, la consommation de laitue est également significative : un Belge en consomme en moyenne 3,4 kg par an (Valente 2022). La production nationale de laitues en pleine terre est bien développée, totalisant environ 1 200 hectares, dont la grande majorité est située en Flandre (environ 95 %), avec un rendement moyen de 72 000 laitues par hectare (Valente 2022).

Outre son importance économique et alimentaire, la laitue est couramment utilisée comme culture de référence dans la recherche. Elle est utilisée en agronomie pour tester différentes pratiques culturales telles que l’irrigation (Zijing et al. 2019), la fertilisation (Boroujerdnia et Ansari 2007) ou encore des techniques de culture (Gargaro et al. 2023). En biotechnologie, elle a été soumise à différentes manipulations génétiques permettant d’améliorer sa résistance aux maladies (McHale et al. 2009) ou d’optimiser sa qualité nutritionnelle (Chen et al. 2019). Elle joue également un rôle en toxicologie, où elle sert de bioindicateur face à divers polluants (Priac 2014). Enfin, la laitue est même cultivée dans l’espace, dans le cadre de recherches sur l’agriculture en milieu extrême (Khodadad et al. 2020).

La laitue a également déjà fait l’objet de nombreuses recherches dans le cadre de la culture en agrivoltaïsme (Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013; Marrou, Wery, et al. 2013; Elamri et al. 2018; R. F. Ferreira et al. 2024).

2.1.2. Choix variétal

La laitue est une plante herbacée annuelle dicotylédone appartenant à la famille des Asteraceae. Cette famille est l'une des plus vastes du règne végétal, regroupant entre 23 000 et 30 000 espèces (Still 2007). Selon l'Institut national de la recherche agronomique, l'espèce *Lactuca sativa* est subdivisée en cinq grands types : la laitue à couper, la laitue grasse, la laitue romaine, la laitue beurre et la laitue batavia (Maisonnette 2013). Dans le cadre de cette étude, la laitue batavia a été retenue, et plus précisément la variété *Amaroza*.

Cette variété représente un choix pertinent en raison de ses qualités agronomiques. Elle est adaptée à la culture en extérieur ainsi qu'en serre, mais supporte mal les températures extrêmes (Enza Zaden, s. d.). Ainsi, elle n'est pas recommandée pour une culture sous serre en été, mais convient bien à une culture précoce dans la saison. Son intérêt commercial est aussi à prendre en compte, de fait, elle est bien répandue sur le marché (Agrosemens, s. d.).

Cette variété présente une haute résistance aux races 29 à 41 du *Bremia lactucae*, responsable du mildiou de la laitue en Europe, ainsi qu'à *Nasonovia ribisnigri*, un puceron spécifique à cette culture. Elle présente également une résistance intermédiaire au *Lettuce Mosaic Virus* (LMV), souche 1, qui provoque des déformations et des taches sur les feuilles, ainsi qu'au champignon *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae*, race 4, responsable de la fusariose de la laitue (Enza Zaden, s. d.).

Pour finir, la variété *Amaroza* a déjà été utilisée en 2023 et 2024 lors d'une pré-étude sur la plateforme WASABI (plateforme Wallonne de Systèmes innovants en Agriculture et Biodiversité urbaine), où elle a montré de bons rendements et une bonne adaptation aux conditions pédoclimatiques belges, ce qui constitue un atout pour assurer la reproductibilité et la fiabilité de cette expérimentation.

2.1.3. Exigences de la laitue

Le tableau 1 présente une brève description des exigences de la laitue *Amaroza*.

Tableau 1 : Synthèse des exigences de la laitue *Amaroza* (*Lactuca sativa* L., 1753). Source : (Agrosemens, s. d.; Tisserand 2023; Verolet et al. 2000; Al-Said et al. 2018).

Caractéristiques		
Sol	<p>pH : 6 - 7</p> <p>Structure : Aéré car sensible à l'asphyxie racinaire</p> <p>Matière organique : entre 5 à 8 %</p> <p>Carences : bore, molybdène, zinc, cuivre et magnésium</p> <p>Eléments nutritifs par cycle cultural : 100 kg/ha de N, 50 kg/ha de P₂O₅ et de 250 kg/ha de K₂O.</p>	
Lumière	<p>PPFD : 150 et 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$</p> <p>Intégrale de lumière journalière (DLI) : 11,5 $\text{mol.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$</p>	
Température	Air	Sol
	<p>Minimum : 3 °C</p> <p>Optimum : 18 °C</p>	<p>Minimum : 7 °C</p> <p>Optimum : 12 °C</p>
Humidité relative de l'air	40 à 85 %	
Culture	<p>Repiquage : au stade 4ème feuille naissante</p> <p>Espacement entre plants : 30 cm</p> <p>Densité : 6 à 12 plants/m²</p> <p>Durée culture : 6 semaines</p> <p>Poids frais moyen lors de la récolte : entre 200g et 300g</p>	
Ravageurs potentiels (liste non exhaustive)	Déjà observé sur la parcelle WASABI	Jamais observé sur la parcelle WASABI
	<p>Limaces et escargots (<i>Stylommatophora Schmidt (d), 1856</i>) ;</p> <p>Campagnols (<i>Microtus arvalis (Pallas, 1778)</i>) ;</p> <p>Mulots (<i>Apodemus sylvaticus (Linnaeus, 1758)</i>) ;</p> <p>Taupins (<i>Agriotes sputator (Linnaeus, 1758)</i>) ;</p> <p>Pucerons (<i>Pemphigus Hartig, 1839</i>).</p>	<p>Noctuelles terricoles (<i>Agrotis spp., Noctua spp., Peridroma sp. et Xestia spp.</i>).</p>
Maladies potentielle (liste non exhaustive)	Déjà observé sur la parcelle WASABI	Jamais observé sur la parcelle WASABI
	/	<p>Mildiou des Astéracées (<i>Bremia lactucae Regel, 1843</i>) ;</p> <p>Fonte des semis et pourriture du collet ou de la base des feuilles (<i>Botrytis cinerea Pers. 1794, Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) de Bary, 1884, Rhizoctonia solani Kühn, 1858</i>) ;</p> <p>Bactérioses de la laitue (<i>Xanthomonas campestris pv. vitians</i>).</p>

2.2. Panneaux photovoltaïques bifaciaux

2.2.1. Principe des panneaux bifaciaux

Les panneaux photovoltaïques bifaciaux fonctionnent selon le même principe que les panneaux solaires conventionnels, appelés monofaciaux. Ils reposent sur l'effet photoélectrique, un phénomène physique selon lequel les électrons présents dans les cellules photovoltaïques sont excités lorsqu'ils absorbent des photons issus de la lumière solaire. Cette excitation permet la production d'électricité (Mouhib et al. 2022; Einstein 1905).

Ce qui différencie les panneaux solaires bifaciaux des monofaciaux est qu'ils sont constitués de cellules photovoltaïques capables de capter la lumière à la fois sur leurs faces supérieure et inférieure (Shen Liang et al. 2019). Leur fonctionnement repose donc en partie sur la réflectivité solaire du sol, également appelée albédo. La lumière solaire, en se réfléchissant sur les surfaces situées derrière les panneaux, contribue à une production d'électricité supplémentaire (Gu et al. 2020) (figure 1). Leurs faces inférieures sont ainsi recouvertes d'une plaque de verre ou d'un polymère transparent, permettant à la lumière d'être absorbée des deux côtés (Stein et al. 2021).

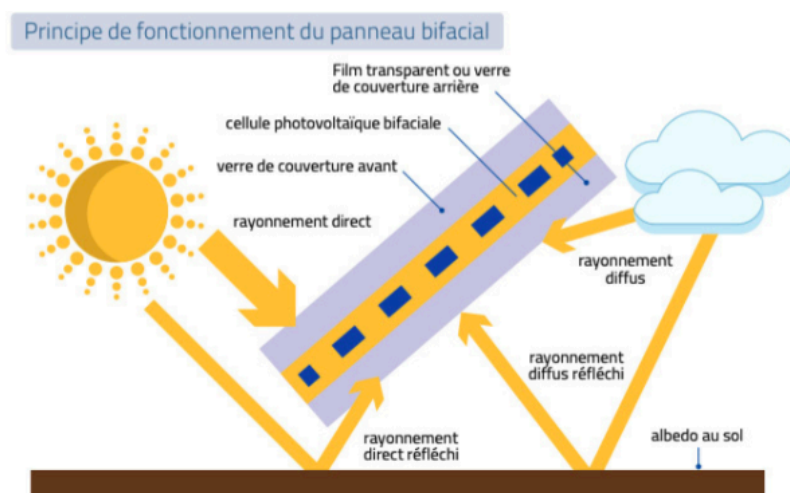


Figure 1 : Représentation schématique de la structure et du fonctionnement des panneaux photovoltaïques bifaciaux. Source : Fabrégat 2021

Cette capacité à produire de l'électricité par leurs faces supérieures et inférieures leur offre deux avantages notables.

Premièrement, cela leur permet d'obtenir un gain de rendement entre 5 % et 30 % par rapport aux panneaux monofaciaux (Gu et al. 2020; Stein et al. 2021; Wei et al. 2016; Yu et al. 2016).

Ensuite, les panneaux photovoltaïques bifaciaux offrent une plus grande flexibilité d'installation par rapport aux panneaux monofaciaux. Ils peuvent notamment être disposés verticalement, ce qui permet leur intégration dans des environnements complexes ou contraints en termes d'espace (Gu et al. 2020). Cette configuration facilite également leur utilisation dans des infrastructures telles que les barrières antibruit (Faturrochman et al. 2018), ou encore dans des systèmes agrivoltaïques, que ce soit en grandes cultures (soja, maïs, blé), en cultures maraîchères, ou dans des zones de pâturage, où ils peuvent à la fois fournir de l'ombrage et servir de barrières physiques (Garrod et Ghosh 2023; Mahim et al. 2024).

2.2.2. Importance des panneaux photovoltaïques

Face aux défis climatiques et à l'épuisement des ressources fossiles (Calvin et al. 2023), le photovoltaïque s'impose aujourd'hui comme une solution concrète pour un avenir énergétique plus durable. Depuis sa démocratisation dans les années 2000, son utilisation a connu une croissance à l'échelle mondiale. En effet, la production d'électricité photovoltaïque est passée de 1,03 TWh en 2000 à 1629,9 TWh en 2023, représentant ainsi 5,53 % de la production mondiale d'électricité (Énerg. Sol. 2024).

Cette expansion s'explique notamment par d'importantes avancées technologiques, qui ont rendu les panneaux solaires à la fois plus performants et plus accessibles. En seulement dix ans, leur coût a été divisé par deux (Tegas 2022), facilitant leur déploiement à grande échelle. De plus, leur durée de vie prolongée et leur recyclabilité, atteignant un taux de 95 % à 99 % (Greenpeace Fr. 2025), renforcent leur statut de source d'énergie propre et durable.

Néanmoins, cette progression demeure insuffisante. Actuellement, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), l'énergie photovoltaïque ne représente qu'environ 7 % de la production mondiale d'électricité, contre près de 35 % pour le charbon. Afin de maintenir l'augmentation moyenne de la température mondiale en dessous de 1,5 °C (Calvin et al. 2023), il est indispensable d'accélérer le déploiement des énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire thermique et marine), qui devront croître d'environ 15 % entre 2024 et 2030 (IEA, s. d.).

Une piste prometteuse consiste à optimiser l'utilisation des terres via l'agrivoltaïsme. Il a été estimé que si moins de 1 % des terres cultivées étaient converties en systèmes agrivoltaïques, la production solaire pourrait suffire à couvrir la demande énergétique mondiale (Adeh et al. 2019).

2.2.3. Facteurs influençant la production d'électricité des panneaux bifaciaux

La production d'électricité des panneaux photovoltaïques bifaciaux est influencée par plusieurs facteurs : leur inclinaison, leur orientation, l'albédo du sol, leur hauteur d'installation, leur densité d'installation et leur température.

L'orientation et l'inclinaison des panneaux jouent un rôle déterminant dans la quantité de rayonnement solaire captée et donc de leur rendement énergétique.

Lorsqu'ils sont orientés vers le sud (pour l'hémisphère nord), leur inclinaison optimale dépend de nombreux paramètres tels que l'angle d'azimut du soleil, la latitude, la saison et la pente du sol (Appelbaum 2016).

Lorsque les panneaux sont orientés est-ouest, la littérature met en avant deux configurations principales. La première est la position verticale, qui permet de capter les rayons du soleil sur une face le matin et sur l'autre l'après-midi. Cette disposition assure une production d'électricité plus constante que les panneaux orientés vers le sud, malgré une diminution de production au zénith (figure 2) (Kopecek et Libal 2021). Toutefois, il n'existe pas de consensus scientifique sur la disposition offrant le meilleur rendement énergétique entre les panneaux bifaciaux verticaux est-ouest et ceux inclinés vers le sud (Appelbaum 2016; Badran et Dhimish 2024; Katsikogiannis et al. 2022).

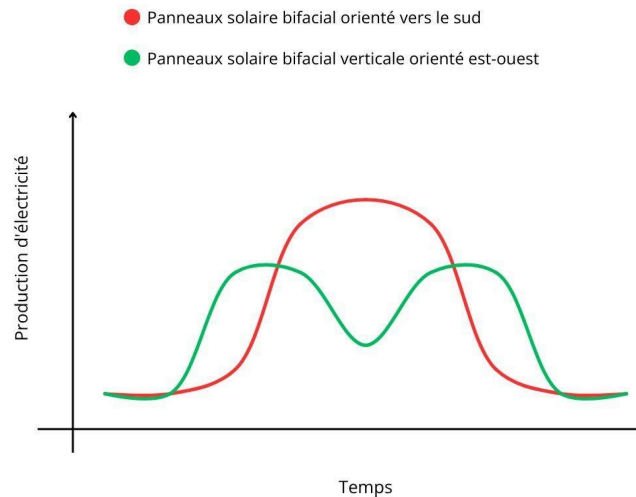


Figure 2 : Représentation schématique de la production d'électricité journalière de panneaux solaires bifaciaux orientés vers le sud (rouge) et en position verticale orientée est-ouest (vert). Source : Solenn Lecat

La seconde configuration est la position horizontale (Kopecek et Libal 2021). Elle permet facilement une double utilisation du sol (Ramos-Fuentes 2025). Cependant, un inconvénient majeur de cette configuration pour les PV est l'accumulation de poussières et de débris organiques et inertes, tels que des feuilles mortes, des branches ou divers résidus transportés par le vent (Gu et al. 2020).

Ce phénomène a un effet notable sur le rendement des panneaux, les pertes annuelles moyennes d'énergie liées à l'encrassement étant généralement estimées entre 3 et 14 % (Gostein et al. 2013).

D'autres facteurs influencent également la production d'électricité des panneaux photovoltaïques bifaciaux. L'albédo de la surface située sous les panneaux joue un rôle important : plus cette surface est claire, plus elle réfléchit le rayonnement solaire, ce qui augmente la quantité de lumière incidente sur la face arrière des panneaux et par conséquent, la production d'électricité (Riedel-Lyngskær et al. 2022). Ces auteurs ont notamment mis en évidence que la présence de végétation fraîche sous des panneaux bifaciaux fixes permettait d'obtenir environ 20 % de lumière incidente en plus, conduisant ainsi à une augmentation de la production d'électricité par rapport aux systèmes photovoltaïques monofaciaux.

La hauteur à laquelle les panneaux photovoltaïques bifaciaux sont installés joue également un rôle important dans leur performance. Une installation plus haute permet de limiter l'ombre que les panneaux projettent sur eux-mêmes (auto-ombrage) et d'augmenter la quantité de lumière réfléchie par le sol qui atteint leur face arrière (Gu et al. 2020). Il est généralement recommandé de les positionner entre 0,5 et 1,5 m au-dessus du sol pour optimiser leur rendement énergétique (Yusufoglu et al. 2015).

La densité d'installation des panneaux photovoltaïques a également un impact sur leur performance. L'espacement entre et au sein des rangées de panneaux influence directement la quantité de lumière atteignant la face arrière des panneaux bifaciaux. Plusieurs études se sont penchées sur la recherche d'espacements optimaux afin de maximiser la production d'électricité (Deline et al. 2017; Marion et al. 2017; Pelaez et al. 2019). Toutefois, ce paramètre dépend fortement de nombreux facteurs tels que le type de panneaux utilisés, leur orientation, leur inclinaison, leur surface, ainsi que des conditions du milieu environnant, comme l'uniformité de la surface au sol ou les conditions d'ensoleillement.

Par ailleurs, ces études mettent également en évidence l'existence d'un effet de bordure. L'irradiation arrière tend à diminuer progressivement lorsqu'on passe d'un panneau situé à l'extrémité d'une rangée vers ceux positionnés au centre (figure 3). En poussant ce concept à l'extrême, il apparaît qu'un panneau isolé peut recevoir jusqu'à 45 % d'irradiation arrière en plus qu'un panneau situé au centre d'un alignement (Stein et al. 2021).

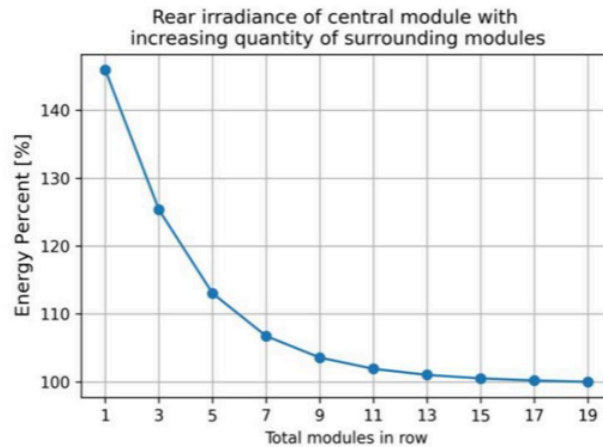


Figure 3 : Irradiance arrière relative pour le module central de panneaux photovoltaïques d'une rangée en fonction du nombre de modules dans la rangée. 100 % représente l'irradiance la plus faible au centre d'une longue rangée de modules. Source : Stein et al. 2021

Enfin, la température a un impact direct sur l'efficacité des panneaux photovoltaïques. En général, chaque degré supplémentaire au-dessus de 25 °C entraîne une diminution du rendement d'environ 0,6 % C⁻¹ (Barron-Gafford et al. 2019).

2.3. Système agrivoltaïsme

2.3.1. Principe de l'agrivoltaïsme

L'Agence de la transition écologique (ADEME) propose une définition de l'agrivoltaïsme, formulée en français comme suit :

Une installation photovoltaïque 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 du bien-être animal*
- *Service agronomique précis pour les besoins des cultures (atténuation des stress abiotiques)*

2.3.2. Importance de l'agrivoltaïsme

Le développement de l'agrivoltaïsme a connu une très forte croissance ces dernières années. La capacité installée mondiale est passée de 5 MW en 2012 à 2,8 GW en 2020 (Gorjian et al. 2022). Cette expansion est en partie due à la nécessité de répondre aux défis posés par le changement climatique, qui impose une transition vers les énergies renouvelables (Calvin et al. 2023). Elle résulte également du besoin d'optimiser l'usage des surfaces disponibles. En effet, d'après la FAO, la quantité de terres arables disponibles par habitant a diminué de 48 % entre 1961 et 2016 (World Bank Open Data, s. d.). Cette diminution s'explique par plusieurs facteurs, notamment l'urbanisation (L. M. R. Ferreira et al. 2019), l'industrialisation agricole intensive entraînant la perte de fertilité des sols (Martin 2016), la pollution aux métaux lourds (Mohammed et al. 2011), pesticides (Imfeld et Vuilleumier 2012) et hydrocarbures (Zhang et Chen 2017) ainsi que les changements d'usage des terres, tels que leur conversion vers des cultures non alimentaires (Bamière et Bellassen 2018).

Face à ces enjeux, l'agrivoltaïsme apparaît comme une solution pour concilier production alimentaire et production énergétique (Zainol Abidin et al. 2021).

2.3.3. Avantages de l'agrivoltaïsme

Les systèmes agrivoltaïques présentent des avantages tant pour les panneaux photovoltaïques que pour les cultures associées. La présence de ces deux éléments permet de créer un microclimat dont l'ampleur dépend fortement du dispositif mis en place (Zainol Abidin et al. 2021), rendant difficile l'obtention de chiffres précis sur l'influence des panneaux solaires.

L'ombrage généré par les panneaux photovoltaïques peut être bénéfique pour certaines plantes sensibles à une forte exposition au soleil, telles que certaines plantes aromatiques (Zainol Abidin et al. 2021). La présence des panneaux contribue également à modérer les températures en réduisant les pics de chaleur en journée et en maintenant des températures plus élevées la nuit (Armstrong et al. 2016). Cet effet constitue un atout majeur face au changement climatique, dans un contexte où des conditions météorologiques plus extrêmes sont attendues (Calvin et al. 2023). Par ailleurs, cette régulation thermique bénéficie également aux panneaux photovoltaïques eux-mêmes, car la fraîcheur apportée par les cultures situées en dessous permet de réduire leur température et d'améliorer ainsi leur efficacité énergétique (Dupraz et al. 2011).

De plus, les panneaux photovoltaïques apportent une protection contre le vent (Marrou, Guillioni, et al. 2013) et contre certains événements climatiques extrêmes, comme la grêle (Adeh et al. 2019). Ils influencent également la répartition des précipitations en créant des zones protégées des intempéries (Marrou, Wery, et al. 2013; Zainol Abidin et al. 2021).

D'un point de vue énergétique et économique, l'agrivoltaïsme réduit la dépendance aux énergies fossiles en garantissant une sécurité énergétique pour les agriculteurs. Il est également possible de vendre la production électrique, générant ainsi un revenu supplémentaire (Zainol Abidin et al. 2021). Ce système facilite par ailleurs l'installation d'infrastructures agricoles nécessitant de l'électricité dans des zones isolées. Il pourrait notamment permettre l'alimentation de pompes à eau, de réfrigérateurs ou d'autres outils agricoles (Atallah et al. 2025).

2.3.4. Inconvénients de l'agrivoltaïsme

L'agrivoltaïsme comporte également plusieurs limites qu'il convient de prendre en compte.

L'installation de panneaux photovoltaïques constitue un investissement initial important. Toutefois, plusieurs études indiquent que cet investissement peut être rentabilisé relativement rapidement, avec un retour sur investissement estimé à environ cinq ans (R. F. Ferreira et al. 2024; Anusuya et al. 2024). Cependant, ces chiffres doivent être interprétés avec prudence, car ils varient en fonction du type d'installation agrivoltaïque et des cultures sélectionnées. De plus, l'implantation de tels systèmes nécessite le recours à une main-d'œuvre spécialisée avec une expertise technique, qui ne sont pas toujours disponibles, notamment dans certains pays du sud (Weselek et al. 2019).

Le microclimat apporté par les panneaux solaires peut avoir des effets négatifs sur les rendements agricoles, en particulier pour les cultures qui ont besoin de beaucoup d'ensoleillement (Weselek et al. 2019; Zainol Abidin et al. 2021). De plus, d'autres effets négatifs peuvent découler de ce système de production. Tout d'abord, bien qu'aucune étude n'ait été trouvée concernant l'impact de la construction et l'installation de PV sur les paramètres du sol, certains éléments permettent d'en supposer des effets défavorables. L'installation des structures PV implique souvent l'utilisation

d'engins lourds, mais aussi la création de tranchées pour le passage de câbles, cela pouvant entraîner un tassement du sol, défavorable au rendement agricole (Shah et al. 2017). Ensuite, un autre impact concerne la redistribution de l'eau sur la parcelle. Les panneaux créent des zones abritées directement sous leur surface, tandis que l'eau ruisselle et s'accumule sous les bords des structures, créant des zones plus humides. En cas de fortes précipitations, ce ruissellement peut provoquer une érosion du sol, négatif pour les cultures (Elamri et al. 2017).

L'intégration de panneaux photovoltaïques dans des systèmes agricoles implique également des ajustements techniques qui peuvent impacter la production d'électricité. En effet, la densité des panneaux doit être réduite par rapport à celle d'une centrale photovoltaïque classique, afin de garantir une disponibilité suffisante en lumière pour les cultures situées en dessous (Weselek et al. 2019). De plus, la hauteur et la disposition des panneaux peuvent être adaptées pour permettre l'utilisation de machines agricoles, notamment dans le cadre de grandes exploitations, où la circulation de tracteurs entre ou sous ces structures devient nécessaire (Laub et al. 2022; Weselek et al. 2019). Par ailleurs, le rendement photovoltaïque peut également être affecté par des dépôts de poussière sur les panneaux, dus aux opérations agricoles telles que le travail du sol ou la récolte (Dinesh et Pearce 2016). Ce phénomène est problématique dans les régions à faibles précipitations, où un nettoyage régulier devient nécessaire, représentant une charge de travail supplémentaire. Cependant, certaines études suggèrent la possibilité d'utiliser l'eau de nettoyage pour irriguer les cultures, permettant ainsi un double usage de cette ressource (Ravi et al. 2016).

L'intégration de panneaux photovoltaïques dans les systèmes agricoles soulève également des enjeux d'ordre législatif. En effet, l'intégration de panneaux solaires dans des terres agricoles pourrait entraîner une redéfinition des termes légaux des terres arables (Weselek et al. 2019). Cette modification pourrait avoir des répercussions sur les aides attribuées aux agriculteurs, en particulier celles accordées par la Politique agricole commune (PAC) (Ramos-Fuentes 2025). De plus, il est également nécessaire d'éviter l'émergence d'une nouvelle forme de spéculation autour des terres agricoles, où certains projets exploiteraient l'agriculture de manière minimale uniquement pour bénéficier des autorisations d'installation de panneaux solaires. Pour répondre à ce risque Weselek et al. 2019 proposent d'instaurer un seuil minimal de rendement agricole, afin de garantir une réelle activité productive sous les installations photovoltaïques.

À ce jour, peu d'études se sont intéressées à l'impact des panneaux photovoltaïques sur la biodiversité, et aucune, à notre connaissance, n'a spécifiquement examiné les effets négatifs potentiels dans un contexte agrivoltaïque. Toutefois, certains travaux menés sur les installations photovoltaïques suggèrent que ces structures pourraient avoir un impact significatif sur certaines espèces de faune sauvage, notamment les oiseaux et les chauves-souris (Chock et al. 2021; Taylor et al. 2019). Celles-ci pourraient confondre les panneaux solaires avec des surfaces d'eau en raison de leurs reflets ou de leur aspect plan, entraînant ainsi des collisions, avec pour conséquences possibles des blessures ou la mort.

Pour finir, l'acceptation sociale de l'agrivoltaïsme est une autre barrière potentielle souvent oubliée, alors que déterminante dans la création de projet (Wüstenhagen et al. 2007). En effet, certains citoyens peuvent se montrer réticents à l'utilisation de panneaux solaires en agriculture, par méconnaissance ou par crainte (Sovacool et Lakshmi Ratan 2012). Sans compter que cette crainte est également partagée par une partie des agriculteurs eux-mêmes (Pascaris et al. 2020). De plus, l'impact visuel des structures agrivoltaïques sur le paysage suscite également des oppositions (Schröter et al. 2023).

2.3.5. La laitue en agrivoltaïsme

2.3.5.1. Besoin en lumière des laitues

La lumière est un facteur essentiel dans la production végétale, car elle permet la photosynthèse, un processus par lequel les plantes convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique sous forme de sucres. Cette conversion est assurée par les pigments chlorophylliens, qui absorbent principalement la lumière bleue (400-500 nm) et rouge (600-700 nm) (McCree 1972). Ce spectre lumineux est appelé rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, Photosynthetically Active Radiation). Une mesure couramment utilisée en recherche scientifique est le PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density), qui quantifie le flux de photons actifs pour la photosynthèse, donc comprise dans le PAR, atteignant la surface foliaire par unité de temps (exprimé en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Dresch 2024). Il est possible de calculer l'intégrale de lumière journalière (DLI, daily light integral) qui est d'après Gavhane et al. 2023 se définit comme la quantité totale de rayonnement photosynthétiquement actif délivrée aux plantes sur une période de 24 heures.

Les laitues sont des cultures pouvant être tolérantes à l'ombre. Elles nécessitent un PPFD compris entre 150 et 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour une croissance optimale (Chen et al. 2019) correspondant à un DLI de 11,5 $\text{mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ pour une journée de 16 heures (Kelly et al. 2020). Alors que d'autres cultures comme la tomate demande un éclairage aux alentours de 600 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Setynk 2023) cela fait donc, de la laitue, une bonne candidate pour l'agrivoltaïsme.

La photopériode, c'est-à-dire la durée d'exposition à la lumière, influence également le développement de la laitue. Une durée de 12 à 18 heures de lumière par jour est recommandée pour assurer une croissance optimale (Silva et al. 2022). Il faut prendre en considération que la biomasse, le nombre de feuilles et la surface foliaire des laitues augmente linéairement entre 12 et 18 h de photopériode (Silva et al. 2022).

L'intégration des cultures sous panneaux photovoltaïques peut poser un défi en raison de la compétition pour la lumière. En effet, bien que partiellement transparents, les panneaux photovoltaïques bifaciaux absorbent un spectre lumineux allant de 400 nm à 1500 nm (Ricaud 2007), incluant ainsi le rayonnement photosynthétiquement actif. En fonction de la densité et de la disposition des panneaux solaires, la quantité d'ombrage donné aux plantes peut être plus ou moins importante.

2.3.5.2. Impact des PV sur les laitues

Plusieurs études ont été menées sur l'impact de la présence de panneaux photovoltaïques sur la culture de laitues (Elamri et al. 2018; R. F. Ferreira et al. 2024; Gorjian et al. 2022; Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013; Marrou, Wery, et al. 2013). Toutefois, ces travaux présentent chacun des caractéristiques techniques spécifiques, tant au niveau des systèmes photovoltaïques utilisés que des pratiques agricoles mises en œuvre. Cette hétérogénéité rend difficile toute comparaison directe entre les résultats obtenus mais elles offrent une vision d'ensemble.

De manière générale, les conclusions de ces études sont plutôt positives, soulignant l'efficacité du modèle agrivoltaïque. L'indice du *Land Equivalent Ratio* (voir point 2.4.1), calculé notamment par Elamri et al. 2018 et R. F. Ferreira et al. 2024, sont systématiquement supérieurs à 1. Cela signifie que la combinaison de production agricole et photovoltaïque est plus avantageuse que les deux activités menées séparément.

Cependant, les résultats divergent en ce qui concerne le rendement des laitues cultivées sous panneaux photovoltaïques. Par exemple, Elamri et al. 2018 rapportent une diminution de rendement comprise entre 15 % et 25 %, qu'ils attribuent à un retard de maturité de 5 à 7 jours. Un ralentissement de la croissance a également été observé par (Elamri et al. 2018; R. F. Ferreira et al. 2024; Gorjian et al. 2022; Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013; Marrou, Wery, et al. 2013), en lien avec un taux d'émission foliaire plus faible durant la phase juvénile (trois semaines après plantation) de la laitue.

À l'inverse, (Elamri et al. 2018; R. F. Ferreira et al. 2024; Gorjian et al. 2022; Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013; Marrou, Wery, et al. 2013) affirment que la présence de panneaux photovoltaïques a peu, voire pas d'effet sur le rendement final. Ils expliquent ce résultat par une amélioration de l'efficacité d'utilisation du rayonnement (voir point 2.4.3), liée à une augmentation de la surface foliaire totale par plante. Cette modification de la surface foliaire totale est également accompagnée d'une diminution du nombre de feuilles, avec des feuilles externes proportionnellement plus grandes. Toutefois, les auteurs soulignent que cette capacité d'adaptation dépend fortement de la variété de laitue étudiée.

D'autres effets de la modification morphologique de la laitue cultivée en système agrivoltaïque ont été rapportés. Elamri et al. 2018; R. F. Ferreira et al. 2024; Gorjian et al. 2022; Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013 et Marrou, Wery, et al. 2013, décrivent une augmentation de la couverture du sol par la canopée des laitues, tandis que Elamri et al. 2018 signalent un épaississement des feuilles.

Afin de limiter les effets négatifs des PV sur le rendement en laitues, plusieurs pistes sont envisagées. Elamri et al. 2018 suggèrent de réduire la densité de panneaux photovoltaïques, tandis que Marrou, Guilioni, et al. 2013 recommandent d'allonger le cycle de culture pour compenser les retards de croissance. Enfin, plusieurs études insistent sur l'intérêt de sélectionner des variétés de laitues mieux adaptées aux conditions d'ombrage (Marrou, Dufour, et al. 2013; Marrou, Guilioni, et al. 2013).

2.4. Indices fréquemment utilisés

2.4.1. Le ratio d'équivalent-terre (LER)

Le ratio d'équivalent-terre (Land Equivalent Ratio, LER) permet de comparer la productivité d'un système combinant production agricole et production photovoltaïque à celle de ces mêmes activités menées séparément sur des surfaces distinctes (Oyejola et Mead 1982). Si le $LER > 1$, le système agrovoltaïque est plus performant que l'utilisation séparée des deux productions. Un $LER = 1$ indique une productivité équivalente, tandis qu'un $LER < 1$ montre une efficacité moindre du système agrovoltaïque.

Le LER se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$LER = \frac{Y_1}{Y_2} + \frac{E_1}{E_2}$$

avec :

- Y_1 : rendement agricole des laitues en système agrovoltaïque (g/m^2);
- Y_2 : rendement agricole des laitues en culture témoins (g/m^2);
- E_1 : la production d'électricité des panneaux photovoltaïques en système agrovoltaïque (kWh/m^2);
- E_2 : la production d'électricité de panneaux photovoltaïques non implanté dans un système agrovoltaïque (kWh/m^2).

2.4.2. L'indice de surface foliaire (LAI)

L'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI) décrit la quantité de surface foliaire par unité de surface horizontale du sol ($m^2.m^{-2}$). Il constitue un indicateur clé de la capacité d'une plante à capter la lumière et à réaliser la photosynthèse (G. Yan et al. 2019).

2.4.3. Efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE)

L'efficacité d'utilisation du rayonnement (Radiation Use Efficiency, RUE) est un indice permettant d'évaluer la conversion du rayonnement intercepté en biomasse (Lake et al. 2021). Cet indicateur mesure l'efficacité de croissance des cultures et aide à expliquer les différences de production de biomasse entre des plantes soumises à des conditions de culture identiques, notamment en termes de luminosité (Z. Yan et al. 2019).

En d'autres termes, le RUE permet de démontrer que certaines laitues peuvent compenser un déficit lumineux et produire une biomasse équivalente à celles ayant bénéficié d'un éclairage optimal.

Le RUE est calculé à l'aide des formules suivantes :

$$RUE = \frac{B_s}{PAR_a} \quad PAR_a = PAR_i \times fPAR_i \quad fPAR_i = 1 - e^{-K \times LAI}$$

Les différentes variables utilisées dans ces formules, leurs unités et la manière de les obtenir, sont détaillées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Liste des variables utiles pour calculer le RUE, avec leurs symboles, unités et utilités.

Symboles	Significations	Unités	Valeurs
RUE	Efficacité d'utilisation du rayonnement	g/mol·m ⁻²	Calculées (formule 1)
B _s	Biomasse sèche	g	Mesurées durant l'étude
PAR _a	Rayonnement photosynthétique actif PAR absorbé	μmol.m ⁻² .s ⁻¹	Calculées (formule 2)
PAR _i	Rayonnement photosynthétique actif PAR incident	μmol.m ⁻² .s ⁻¹	Mesurées durant l'étude
fPAR _i	Fraction du rayonnement photosynthétique actif PAR incident interceptée par la canopée	%	Calculées (formule 3)
K	Coefficient d'extinction du rayonnement	/	= 0,66 ± 0,02 (Tei et al. 1996)
LAI	Indice de surface foliaire	(m ² m ⁻²)	Estimées

3. Matériel et méthode

3.1. Localisation

Cette étude est réalisée sur la plateforme WASABI (plateforme Wallonne de Systèmes innovants en Agriculture et Biodiversité urbaine), implantée sur le campus de Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège, Belgique. Cette plateforme, dédiée à l'innovation en agriculture et à la biodiversité en milieu urbain, est située aux coordonnées géographiques 50°33'48.2"N 4°41'58.3"E et à une altitude moyenne de 155 m.

3.2. Dispositifs expérimentaux

Dans ce travail, le rendement en laitues, la disponibilité en lumière et la production électrique de panneaux solaires seront étudiés sur quatre dispositifs expérimentaux : culture extérieure avec panneau photovoltaïque (OF_PV), culture extérieure (OF), culture en serre avec panneau photovoltaïque (GH_PV) et culture en serre plastique (GH) (figure 4).

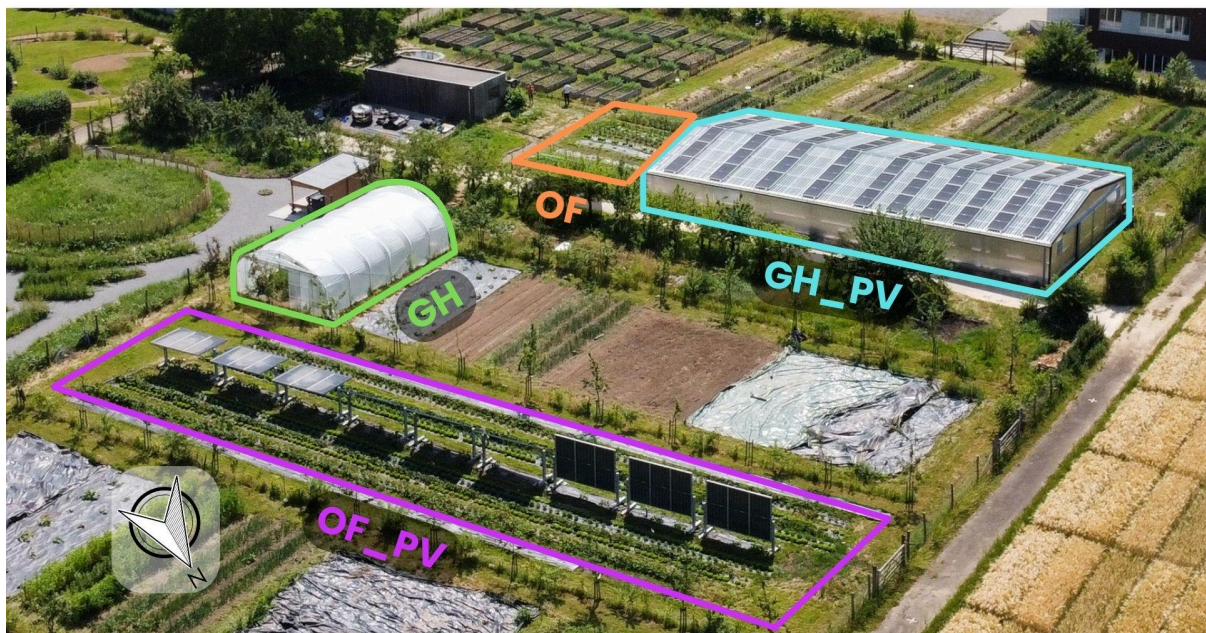


Figure 4 : Photo vue du ciel de la plateforme WASABI avec les quatre dispositifs expérimentaux : culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV), culture extérieure (OF), culture en serre plastique (GH) et culture en serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV), respectivement en mauve, orange, vert et bleu.

Source : Arthur Libault.

3.2.1. Culture en serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV)

Caractéristiques de la serre

La serre a été construite en avril 2024, en suivant un modèle d'un bâtiment agricole. Les murs sont en polycarbonate semi-transparent (transmission lumineuse de 75 %), tandis que le toit est en polycarbonate transparent (transmission lumineuse de 89 %) (annexe 1). Les dimensions de la serre sont de 29 mètres de long pour 14 mètres de large, avec une pente de toit de 11 ° (annexe 2). Comme il y a un décalage de 17 ° entre l'axe de la serre et l'axe Nord-Sud, les pans de toit sont orientés Est Sud Est / Ouest Nord Ouest.

La serre ne dispose ni de système de chauffage ni d'éclairage artificiel mais possède un système d'aération comprenant deux ventilateurs (modèle ES 100 R/S - 31) (annexe 3) et des volets d'aération (modèle ES120) (annexe 4). L'aération est automatisée grâce à un capteur placé au centre de la serre, qui déclenche le système en fonction des conditions climatiques. Pour chaque planche de culture, un système d'irrigation est en place, composé de trois tuyaux microporeux (annexe 5) connectés à une vanne, ainsi qu'un compteur d'eau.

Panneaux solaires

Les panneaux photovoltaïques sont disposés en lignes sur le toit de la serre, dans le sens de la pente. Les lignes de PV sont espacées de telle façon à avoir une couverture photovoltaïque de 33 % (GH_33) du côté sud et de 50 % (GH_50) du côté nord du toit (figures 5 et 6).

Le modèle des PV utilisés est un modèle bifacial, le Tiger Neo N-type 72HL4-BDV 550-570 Watt (annexe 6). Tous les panneaux sont reliés à un onduleur unique, impliquant une seule mesure de production électrique pour l'ensemble de la serre. Cet onduleur est connecté à un serveur, offrant un suivi en temps réel de la production énergétique.



Figure 5 : Photo de l'intérieur de la serre avec panneaux photovoltaïques de la plateforme WASABI. Au premier plan, la modalité 33 %, et à l'arrière-plan, la modalité 50 %. Source : Arthur Libault.

Cultures

La serre comprend 11 planches de culture, chacune mesurant 25 mètres de long et 80 centimètres de large. Parmi elles, les planches numéro 5 et 7 sont dédiées à la culture de laitues (figures 5 et 6). Sur ces planches, d'autres cultures seront présentes en même temps que les laitues : des poivrons snack Flynn (*Capsicum annuum* L. 1753) et des fenouils Antares F1 (*Foeniculum vulgare* Mill. 1768) pour la planche numéro 5 ainsi que des poivrons rouges Olly F1 (*Capsicum annuum* L. 1753) et du basilic grand vert (*Ocimum basilicum* L. 1753) pour la planche numéro 7.

Un modèle 3D de la serre a permis d'analyser la répartition de l'ombre générée par les panneaux solaires des deux modalités de couverture. Cette analyse a conduit à la mise en place de zones de suivi scientifique et des espaces "tampons" (non-comptabilisés dans les données scientifiques) pour limiter les effets de bordure et assurer une séparation efficace des deux modalités (annexe 7) (figure 6).

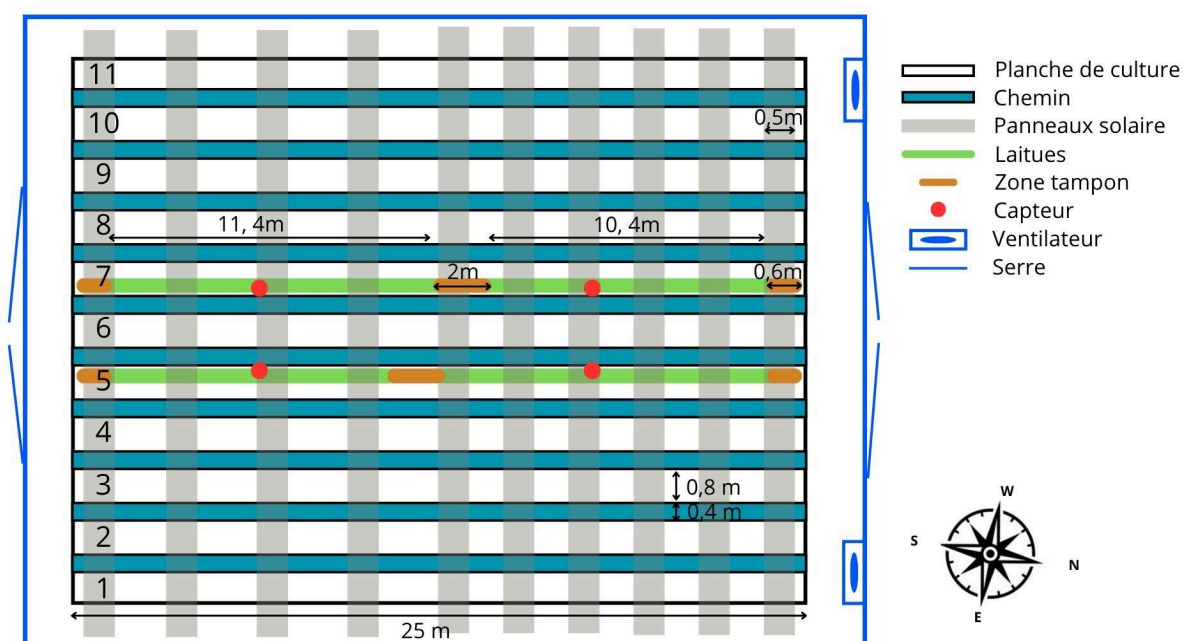


Figure 6 : Représentation schématique, vue du haut, de la serre avec panneaux solaires, installée sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat.

3.2.2. Culture en serre plastique (GH)

Caractéristiques de la serre

La serre utilisée pour ce dispositif expérimental est une serre de type tunnel (figure 7), du fournisseur Schoubs, installée en avril 2025. Elle mesure 12 mètres de long, 7 mètres de large et atteint une hauteur maximale de 3,5 mètres. Comme cette serre est disposée de manière perpendiculaire aux autres dispositifs de culture, les lignes de cultures ne sont pas orientées nord-sud, mais est-ouest. Néanmoins, cela n'aura pas d'influence sur les résultats de rendement en biomasse de laitue en fonction de la disponibilité en lumière, car l'ombrage créé par la serre est uniforme sur toute sa surface et n'est donc pas influencé par son exposition.

La serre ne dispose ni de système de chauffage ni d'éclairage artificiel. L'aération est assurée de manière manuelle, en ouvrant et fermant les portes et les demi-lunes d'aération selon les besoins.



Figure 7 : Photo de l'intérieur de la serre plastique de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault

Cultures

La serre contient 6 planches de culture, chacune d'une longueur de 10 mètres (figure 8). Chaque planche est équipée du même système d'irrigation qu'en serre photovoltaïque.

Les laitues sont cultivées sur la planche n°4, aux côtés de concombres Tyria F1 (*Cucumis sativus* L., 1753). Ce dispositif ne comporte qu'une seule modalité de culture. Des zones tampons de 0,6 mètres ont été mises en place aux extrémités des planches afin de limiter l'effet de bord.

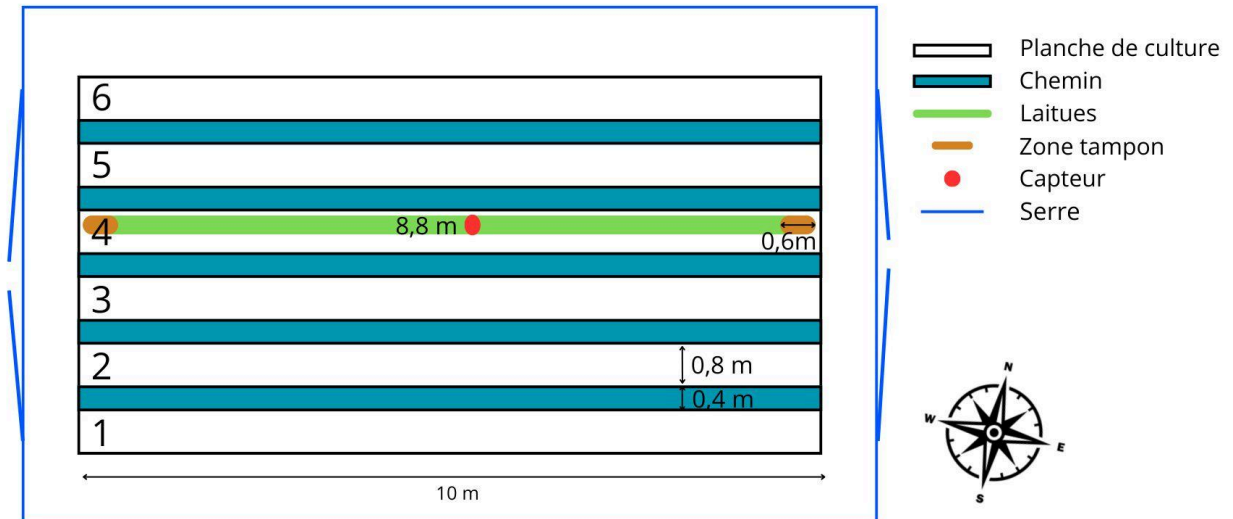


Figure 8 : Représentation schématique, vue du haut, de la serre plastique, installée sur la plateforme WASABI.
Source : Solenn Lecat

3.2.3. Culture extérieure avec panneaux photovoltaïque (OF_PV)

Caractéristiques du milieu

Ce dispositif expérimental est composé d'une ligne orientée Nord-Sud de 9 structures composées de 3 panneaux solaires bifaciaux chacune (figure 9). Néanmoins, cette orientation présente un angle de 17° par rapport à l'axe Nord-Sud, ce qui influence la disposition des 4 planches de culture se trouvant à ses pieds. De plus, le sol sur lequel est implanté le dispositif présente une pente d'environ 2° orientée vers le nord.



Figure 9 : Photo aérienne du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV) de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault

Ce dispositif permet d'évaluer 12 modalités de culture différentes, en combinant trois facteurs : (1) l'orientation des cultures (Est ou Ouest), (2) l'inclinaison des panneaux solaires (0° , 45° ou 90°) et (3) la distance des cultures par rapport aux panneaux (1 ou 2) (figure 10).

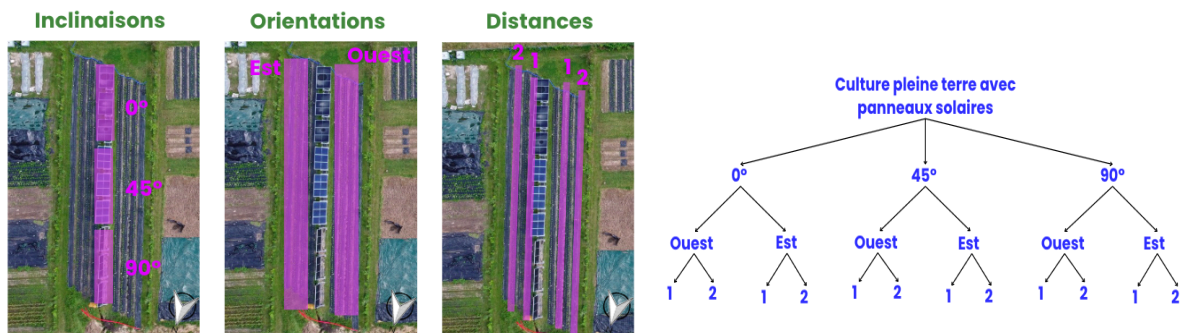


Figure 10 : (a) Représentation schématique sur image aérienne, des trois facteurs composant le dispositif expérimental de culture en extérieur avec panneaux photovoltaïques sur la plateforme WASABI. (b) Représentation en arborescence des 12 modalités du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat

Panneaux solaires

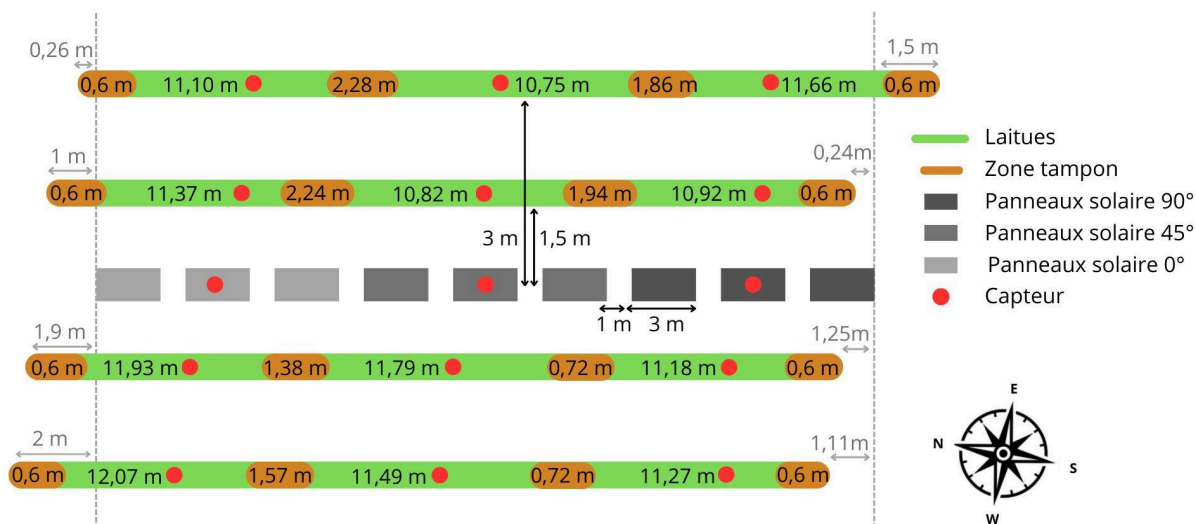
Les panneaux photovoltaïques bifaciaux utilisés sont du modèle Tiger Pro 72HC-TV 525-545 Watt (annexe 8). Chaque panneau structure de trois PV est relié à un onduleur, ce qui permet d'obtenir en temps réel la production d'électricité de chaque structure de manière distincte.

Les six premières structures (modalités 0 ° et 45 °) ont été installées le 23 février 2023, tandis que les trois dernières structures de la modalité 90 ° ont été installées le 18 avril 2024. D'après le fournisseur, les performances des panneaux ne se dégradent pas au cours de la première année d'utilisation (annexe 8). Le rendement des panneaux des deux générations sera donc considéré comme comparable.

Cultures

Comme mentionné plus tôt, la ligne de PV n'est pas parfaitement alignée selon un axe Nord-Sud (décalage de 17 °). En conséquence, les lignes de culture ont été ajustées pour correspondre à l'ombrage projeté par les panneaux solaires (figure 11). Grâce à une modélisation 3D du dispositif expérimental (annexe 9), il a été possible de définir les zones tampons ainsi que les planches de culture des différentes modalités, en fonction des ombrages créés par les panneaux photovoltaïques (figure 11).

Les laitues sont cultivées sur deux lignes de culture, situées respectivement à 1,5 m et 3 m des panneaux solaires (figure 11). Sur la ligne située à 1,5 m, des haricots Dior (*Phaseolus vulgaris* L.) sont également cultivés, tandis que sur la ligne située à 3 m, la culture de laitue sera accompagnée de celle de fraises (*Fragaria* × *ananassa* 'Darselect'). Chaque planche de culture est équipée du même système d'irrigation que les deux dispositifs présentés ci-dessus.



3.2.4. Culture extérieure (OF)

Caractéristiques du milieu

La parcelle de culture en extérieur est située juste devant l'ouverture sud de la serre PV (figure 12). Elle n'est soumise à aucun ombrage, garantissant ainsi une exposition maximale à la lumière naturelle.



Figure 12 : Photo aérienne du dispositif culture extérieure (OF) de la plateforme WASABI. Source : Arthur Libault

Cultures

Ce dispositif de culture est composé de 11 planches (figures 12 et 13). Les laitues sont cultivées dans les lignes 5 et 7, aux côtés des mêmes cultures que celles présentes dans la serre GH_PV. Les lignes de culture sont orientées nord-sud, avec un décalage de 17°. Chaque planche de culture mesure 8 mètres de long.

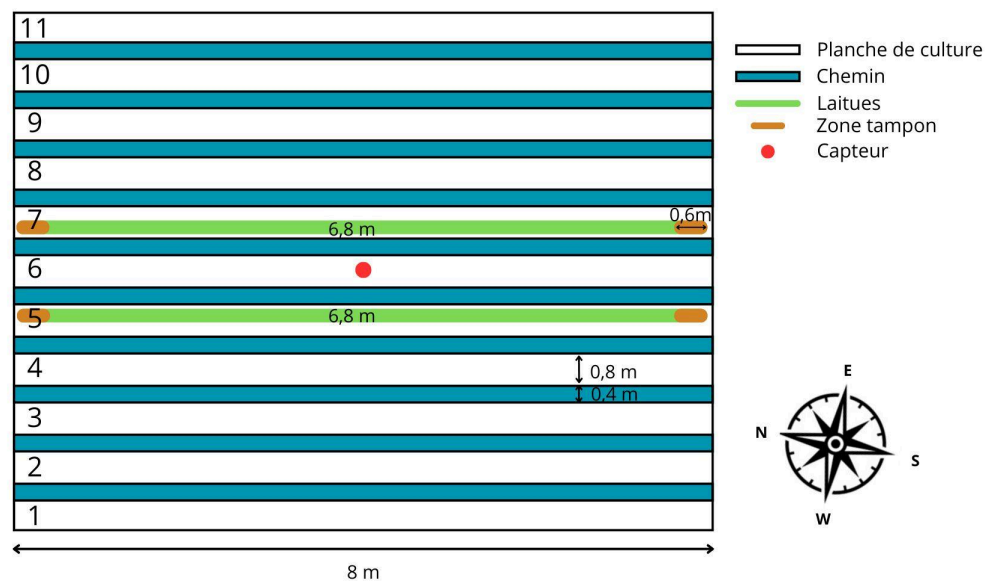


Figure 13 : Représentation schématique, vue du haut, de la parcelle culture en extérieur, installée sur la plateforme WASABI. Source : Solenn Lecat

3.3. Pratiques maraîchères générales

Pour les quatre dispositifs expérimentaux, les laitues ont reçu les mêmes traitements tout au long de leur culture.

Préparation du sol

L'amendement du sol a été réalisé au cours des cinq semaines précédant le repiquage des laitues. Il a consisté en l'apport de compost de déchets verts, provenant de la plaine de Chassart, située à environ 15 km de Gembloux, ainsi que de la chaux magnésienne granulée (annexe 10). Les quantités appliquées étaient de 80 tonnes par hectare de compost et de 600 kg par hectare de chaux.

Le travail du sol a été effectué exclusivement à l'aide de grelinettes, d'émetteurs et d'un motoculteur. Toutes les lignes de culture ont été bachées avec du géotextile noir à l'exception d'une ligne dans le dispositif GH_PV et une dans OF.

Semis et repiquage

Les semences utilisées proviennent du fournisseur Enza Zaden (Enza Zaden, s. d.). Les semis ont été réalisés le 8 avril 2025 par Archenterre, un maraîcher biologique situé à Walhain, spécialisé dans la production de plants de légumes destinés aux professionnels (L'archenterre, s. d.). Les plants ont été gardés en serre dans des conditions optimales de germination et de croissance (20 °C).

Le repiquage a eu lieu le 8 mai 2025, au stade quatre feuilles. Les plants ont été installés avec un espacement de 30 cm entre chaque laitue, en veillant à ne pas enterrer le collet (Agrosemens, s. d.). Les cultures ont été réalisées en une seule ligne de plantation.

Entretien

Pendant toute la durée de la culture, l'eau d'irrigation a été fournie par un forage présent sur le site de WASABI, et assurée par un dispositif de tuyaux microporeux (annexe 5). L'utilisation d'un compteur d'eau permettra de quantifier précisément la consommation d'eau.

Le désherbage a été réalisé à l'aide d'émetteurs et de binettes, dans une démarche de culture zéro phyto. La seule exception concerne l'application de granulés anti-limaces (annexe 11), aucun autre traitement phytosanitaire n'a été appliqué.

3.4. Données abiotiques

Pour chacune des 16 modalités de culture présentées précédemment, un module de capteurs de données abiotiques est installé. Ce module est composé de différents capteurs (annexes 12) permettant d'enregistrer des données toutes les 15 minutes.

Les paramètres mesurés comprennent, pour les capteurs installés en serre, la température du sol et la teneur en eau du sol à 10 cm de profondeur, ainsi que la luminosité et la température de l'air à 10 cm de hauteur. Pour les capteurs installés en extérieur, les mesures portent sur la teneur en eau du sol à 10 cm de profondeur et la luminosité à 10 cm de hauteur. L'ensemble des capteurs a été installé et calibré en mai 2024.

Comme cela a déjà été mentionné, ce travail se concentre sur l'étude de la disponibilité de la lumière pour la culture de la laitue. Les autres données abiotiques seront donc analysées dans le but de vérifier les bonnes conditions de culture.

Une analyse du sol a également été réalisée afin de caractériser au mieux le milieu de culture. Des échantillons de sol ont été collectés le 01/05/2025 et traités par un partenaire du projet de recherche (HEPH Condorcet).

3.5. Variables et indices étudiées

Dans ce travail six variables, décrites dans le tableau 3, vont être étudiées.

Tableau 3 : Liste des variables étudiées, avec leurs symboles et unités.

Variables étudiées	
Rendement en laitues	Bf : Biomasse fraîche (g) ; %Bs : Pourcentage de biomasse sèche (%) ; NbF : Nombre de feuilles (Nombre feuilles.laitues ⁻¹) ; LAI : Indice de surface foliaire (-).
Luminosité	PPFD : Densité de flux photonique photosynthétique ($\mu\text{mol. m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ; DLI : Intégrale de lumière journalière (<i>Daily Light Integral</i>) ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$).
Production d'électricité	E : Production d'électricité (kWh).

3.6. Récolte des données biotiques

La récolte a été réalisée en deux temps. Les laitues cultivées sous serre ont été récoltées le 11 juin 2025, soit après 34 jours de culture. Celles cultivées en extérieur ont été récoltées le 20 juin 2025, correspondant à une durée de culture de 43 jours.

Après avoir été coupées au niveau du collet, les laitues sont nettoyées en retirant les premières feuilles abîmées. Toutes les laitues sont ensuite pesées à l'aide d'une balance (modèle KERN FKB 8K0.05) avec une précision de 0,05 g (annexe 13), afin de déterminer leur biomasse fraîche.

Pour obtenir la biomasse sèche, le nombre de feuilles et le LAI, un tirage aléatoire a été réalisé en amont afin de sélectionner six laitues par modalité.

Les laitues ont été effeuillées de la première feuille commercialisable jusqu'à la dernière feuille mesurant plus de 1 cm de long, afin de connaître le nombre de feuilles par laitue.

Pour déterminer le LAI, le protocole d'une étude interne réalisée en 2025 a été suivi. Celle-ci a établi une relation allométrique entre les dimensions (longueur et largeur) d'une feuille sur huit de laitue Amaroza et le LAI (annexe 14).

Ensuite, les laitues échantillonnées ont été séchées pour déterminer leur biomasse sèche. Les feuilles ont été coupées en deux dans le sens de la largeur et disposées verticalement dans un ravier en aluminium afin d'optimiser le séchage. Le séchage a été effectué dans une étuve Memmert, modèle UF750 (annexe 15), à une température de 40 °C, jusqu'à stabilisation de leur masse (7 jours de séchage).

3.7. Traitements des données

3.7.1. Analyses

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel RStudio (version 4.4.2). Ces analyses ont été organisées en six grandes parties selon la nature des données étudiées.

Analyses de rendement agronomique

Pour les modalités sous serre, des analyses de la variance (ANOVA) à un facteur ont été réalisées, suivies de tests de Tukey HSD pour identifier les différences significatives entre les modalités.

Pour les dispositifs en extérieur, des ANOVA à trois facteurs croisés fixes ont d'abord été effectuées. Lorsque des interactions significatives entre facteurs étaient observées, une ANOVA à un facteur a été utilisée en considérant un facteur combiné (Modalité), représentant l'ensemble des combinaisons testées. Des tests de Tukey HSD ont permis d'identifier les différences entre modalités, et des tests de Dunnett ont été appliqués pour comparer chaque modalité au témoin (modalité OF).

Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin de comparer globalement les dispositifs sous serre et ceux en extérieur.

Analyses de la production d'électricité

Pour chaque modalité, un graphique représentant l'évolution journalière de la production d'électricité sera généré. Par ailleurs, la production moyenne sera comparée entre les modalités à l'aide d'une ANOVA à un facteur, suivie d'un test de Tukey pour identifier les différences significatives.

Analyse de la disponibilité lumineuse

Un graphique illustrant la disponibilité lumineuse journalière en PPFD ainsi que le DLI moyen sera calculé et comparé pour chaque modalité.

Données abiotiques

Cette partie vise à caractériser les conditions environnementales de culture. Les moyennes, minimum et maximum sont déterminées pour la température de l'air, du sol et l'humidité du sol pour chaque modalité. De plus, les résultats de l'analyse physico-chimique du sol sont présentés afin de compléter la description des conditions expérimentales.

Indicateurs

Dans cette partie, l'indicateur d'efficacité d'utilisation du rayonnement est calculé, puis comparés entre les différentes modalités à l'aide d'un test de Tukey HSD.

Corrélations au taux d'ombrage

Des droites de régression seront établies entre la biomasse fraîche ou le nombre de feuilles et le DLI moyen, afin d'identifier l'existence d'éventuelles corrélations entre ces variables.

3.7.2. Contrôle de la qualité des données et tests statistiques

Avant chaque analyse statistique, les données ont été soumises à une série de vérifications visant à garantir la robustesse et la validité des tests réalisés. Une première étape a consisté à identifier et retirer les valeurs aberrantes. Les individus visiblement non commercialisables au moment de la récolte ont été écartés du jeu de données. Par ailleurs, une détection des points influents a été effectuée à l'aide de l'analyse des distances de Cook. Les observations présentant une distance supérieure au seuil de $4/(n-p)$, où n correspond au nombre total d'observations et p au nombre de paramètres estimés, ont été considérées comme influentes et retirées.

Il convient toutefois de noter que cette méthode n'est appliquée aux analyses de variance portant sur les dispositifs sous serre, en raison du faible nombre d'échantillons disponibles. Dans ce cas, le choix a été fait de conserver l'ensemble des données afin de maintenir une variabilité inter-individuelle maximale.

Les conditions d'application des ANOVA ont également été systématiquement vérifiées. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour évaluer la normalité des résidus, tandis que le test de Bartlett a permis de tester l'homogénéité des variances entre modalités. En complément de ces tests statistiques, qui peuvent être sensibles à la taille des échantillons, une inspection visuelle des résidus a été menée.

Les résultats de l'ensemble de ces vérifications (tests statistiques et graphiques) sont disponibles en annexes, pour chaque ANOVA réalisée. Toutes les analyses ont été conduites en respectant un seuil de significativité fixé à $\alpha = 0,05$.

4. Résultats

4.1. Rendement agronomique

4.1.1. Dispositif sous serre (GH et GH_PV)

4.1.1.1. Biomasses

La figure 14 illustre l'effet du taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %) sur la biomasse fraîche et le pourcentage de biomasse sèche des laitues cultivées sous serre. L'analyse de la biomasse fraîche a été réalisée sur 91 échantillons, tandis que celle du pourcentage de biomasse sèche a été effectuée sur 12 échantillons (3 pour les modalités 33 % et 50 %, 6 pour la modalité 0 %). Pour chacun des tests statistiques, les conditions d'application ont été vérifiées et sont détaillées en annexes 16 et 17. Un tableau avec les moyennes et intervalle de confiance de la biomasse fraîche (Bf) et pourcentage de biomasse sèche (%Bs) est accessible en annexe 18.

Les résultats montrent que, pour la biomasse fraîche, la modalité 33 % présente des valeurs significativement supérieures à celles des modalités 0 % et 50 % (figure 14a). En ce qui concerne le pourcentage de biomasse sèche, c'est la modalité 0 % qui est significativement plus élevée que les deux autres (figure 14b).

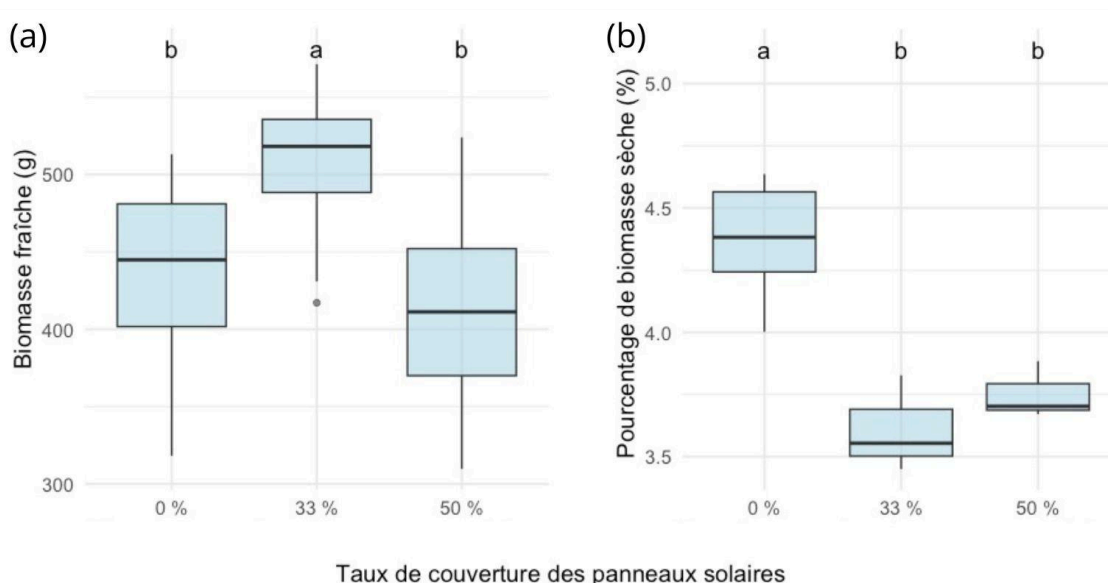


Figure 14 : (a) Répartition de la biomasse fraîche (g) et (b) du pourcentage de biomasse sèche (%) des laitues cultivées sous serre selon le taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %). Les lettres au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

4.1.1.2. Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles par plant a été comparé entre les trois modalités de couverture photovoltaïque (0 %, 33 % et 50 %) à l'aide d'une ANOVA réalisée sur 11 échantillons (5 pour la modalité 0 %, 3 pour les modalités 33 % et 50 %). Les conditions d'application des tests ont été vérifiées et sont présentées en annexe 19. L'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative entre les modalités ($p = 0,597$). Les moyennes correspondantes sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Moyennes du nombre de feuilles par plant de laitue et leur intervalle de confiance à 95 % cultivées sous serre en fonction du taux de couverture des panneaux solaires.

Taux de couverture des panneaux solaires	Moyennes du nombre de feuilles par laitues (feuilles/plant)
0 %	$39,0 \pm 4,5$
33 %	$38,3 \pm 6,9$
50 %	$37,0 \pm 6,5$

4.1.1.3. L'indice de surface foliaire (LAI)

L'effet du taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %) sur l'indice de surface foliaire des laitues cultivées sous serre est présenté à la figure 15. L'analyse statistique est réalisée sur 11 échantillons (5 pour la modalité 0 %, 3 pour les modalités 33 % et 50 %). Les conditions d'application de l'ANOVA sont vérifiées et détaillées en annexe 20. Un tableau avec les moyennes et les intervalles de confiance est accessible en annexe 18.

Les résultats indiquent que la modalité 33 % présente un LAI significativement plus élevé que la modalité 0 %, tandis que la modalité 50 % ne diffère pas significativement des deux autres.

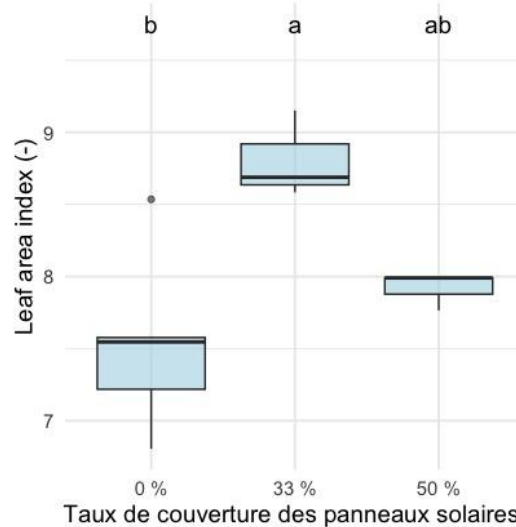


Figure 15 : Répartition de l'indice de surface foliaire (LAI) des laitues cultivées sous serre, en fonction du taux de couverture des panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %). Les lettres au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

4.1.2. Dispositif de culture extérieure (OF et OF_PV)

4.1.2.1. Biomasses

Les analyses de la biomasse fraîche et du pourcentage de biomasse sèche sont réalisées à partir de jeux de données contenant respectivement 391 et 66 échantillons.

En raison d'interactions significatives entre les facteurs étudiés dans les ANOVA à trois facteurs, une ANOVA à un facteur a été réalisée pour chacune des variables, en considérant un facteur unique combinant les modalités expérimentales. Un test de Tukey a ensuite été mené pour identifier les différences entre modalités, ainsi qu'un test de Dunnett afin de comparer chacune d'elles au témoin. Les conditions d'application des tests réalisés sont détaillées en annexe 21 et 22. Un tableau avec les moyennes et intervalle de confiance des résultats est accessible en annexe 23.

Les résultats, pour la biomasse fraîche (figure 16.1a), indiquent qu'aucune inclinaison ne présente, de manière systématique, un effet significatif positif ou négatif pour l'ensemble des modalités (Est, Ouest, Lignes 1 et 2). Cependant, un certain patron se dessine pour chaque inclinaison. À l'Est, les lignes 1 et 2 présentent des rendements similaires, à l'exception de la modalité 0E1. À l'Ouest, en revanche, une différence nette et significative est observée entre les lignes : ligne 1 produit davantage que la ligne 2, notamment pour les inclinaisons à 0 ° et 45 °, mais non significative pour 90 °. Le test de Dunnett (figure 16.1b) indique que seules les modalités 45W1 et 0W1 sont significativement supérieures au témoin OF.

Pour le pourcentage de biomasse sèche, l'ensemble des modalités orientées à l'est (à l'exception de 0E1) présentent des valeurs significativement plus élevées que les modalités orientées à l'ouest (figure 16.2a). Ce résultat est cohérent avec le test de Dunnett, qui indique également que toutes les modalités orientées à l'est, à l'exception de 0E1, sont significativement supérieures au témoin OF (figure 16.2b).

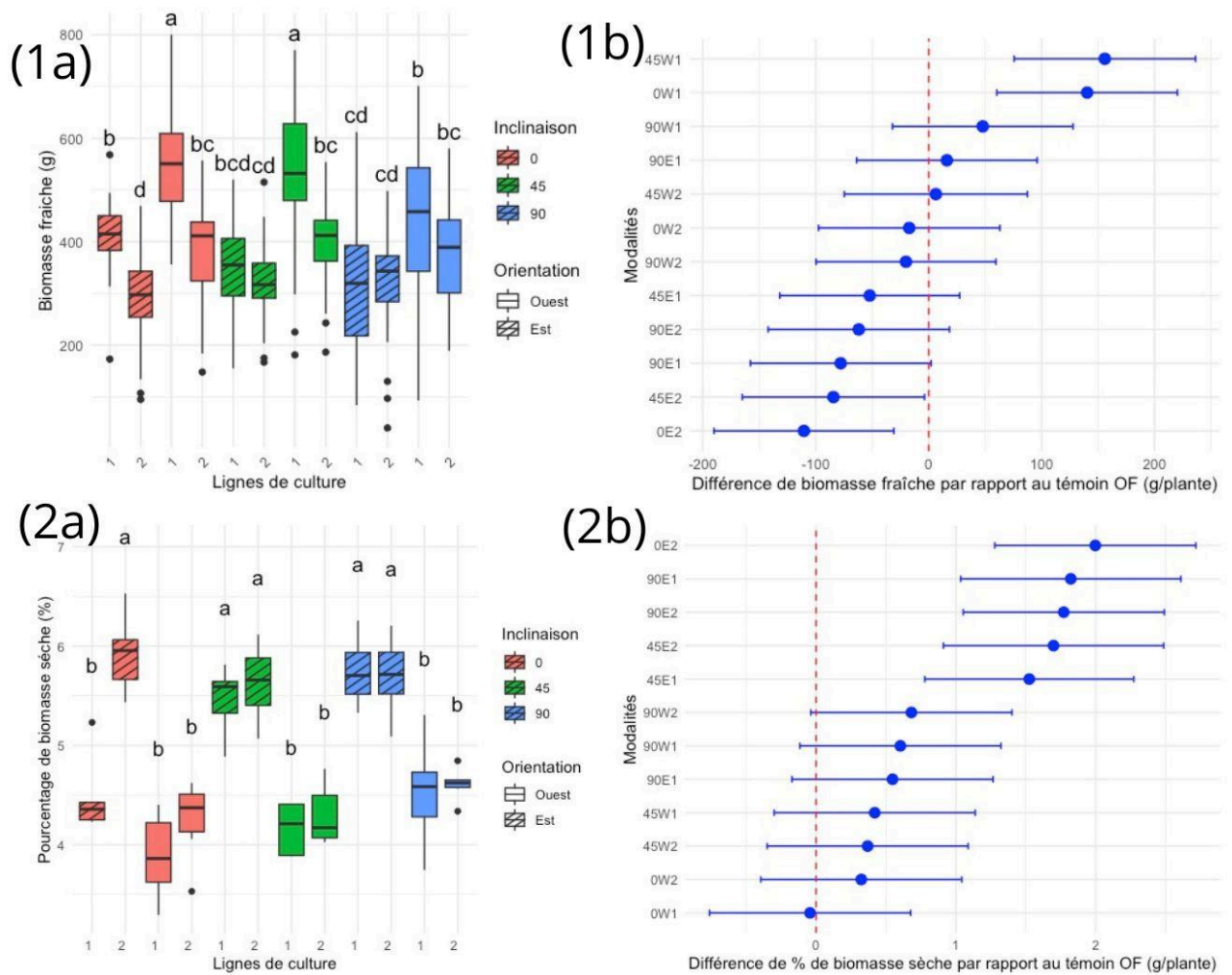


Figure 16 : Les graphiques (1a) et (2a) illustrent l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0 °, 45 ° et 90 °), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur la biomasse fraîche (Bf) et le pourcentage de biomasse sèche (%Bs) des laitues. Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Les graphiques (1b) et (2b) présentent les différences de rendement pour la biomasse fraîche (Bf) et le pourcentage de biomasse sèche (%Bs) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), tels qu'estimées par le test de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.

4.1.2.2. Nombre de feuilles

En raison d'interactions significatives entre les facteurs dans l'ANOVA à trois facteurs, une ANOVA à un facteur, effectuée sur un total de 67 échantillons, a été réalisée pour chacune des variables, en considérant un facteur unique combinant les différentes modalités expérimentales. Cette analyse a été complétée par un test de Tukey, afin d'identifier les différences entre modalités, et par un test de Dunnett, permettant de comparer chacune des modalités au témoin (OF). Les conditions d'application des tests réalisés sont détaillées en annexe 24. Un tableau avec les moyennes et les intervalles de confiance des résultats est accessible en annexe 23.

Les résultats (figure 17) révèlent une variabilité importante du nombre de feuilles (NbF) selon les modalités, avec des moyennes allant de 36 feuilles par plante pour la modalité 45E1 à 44 feuilles pour la modalité 45W1. Parmi l'ensemble des modalités testées, seules cinq ne présentent pas de différence significative avec le témoin, les autres affichent un nombre de feuilles significativement inférieur.

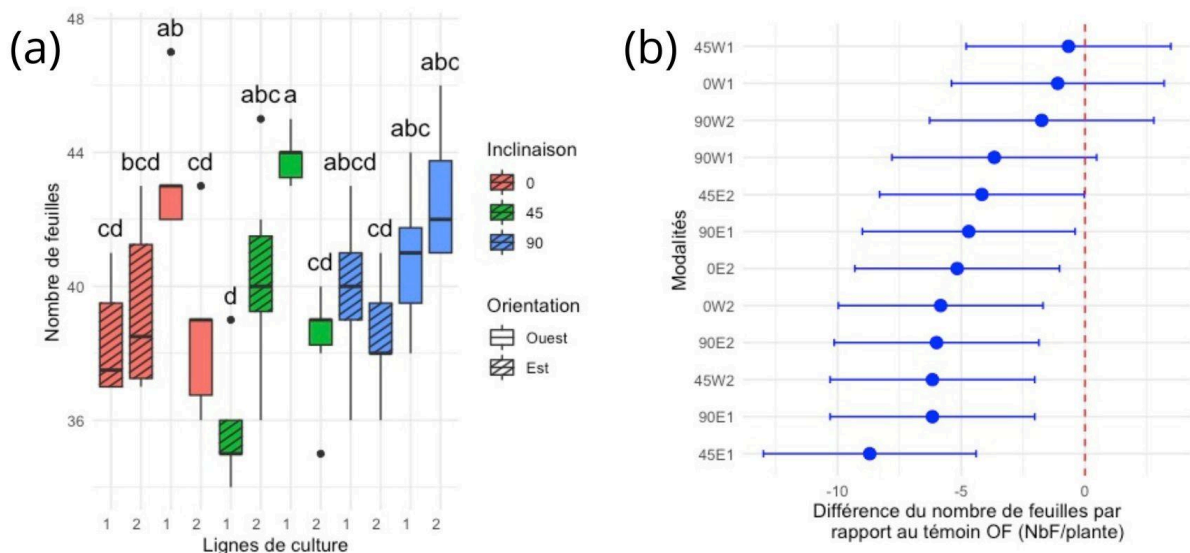


Figure 17 : Le graphique (a) illustre l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0 °, 45 ° et 90 °), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur le nombre de feuilles des laitues (NbF). Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Le graphique (b) présente les différences de nombre de feuilles (NbF) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), telles qu'estimées par le test de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.

4.1.2.3. Indice de surface foliaire (LAI)

Ici également, une ANOVA à un facteur (63 échantillons) a été réalisée à la place d'une ANOVA à trois facteurs, en raison de la présence d'interactions significatives. Un test de Tukey et un test de Dunnett ont ensuite été effectués afin d'identifier les différences significatives entre modalités et de comparer chaque modalité au témoin (OF). Les conditions d'application des tests réalisés sont détaillées en annexe 25. Un tableau avec les moyennes et les intervalles de confiance des résultats est accessible en annexe 23.

Il est possible d'observer sur la figure 18 que la modalité 0W1 se distingue nettement, avec un LAI significativement supérieur à celui de huit autres modalités. Les modalités 0E1, 45W1 et 90W1 présentent des valeurs intermédiaires, ne se différenciant pas significativement de 0W1 ni des huit modalités les moins performantes. Toutefois, seules trois modalités (45E1, 0E2 et 90E2) présentent des performances significativement inférieures à celles du témoin, d'après le test de Dunnett.

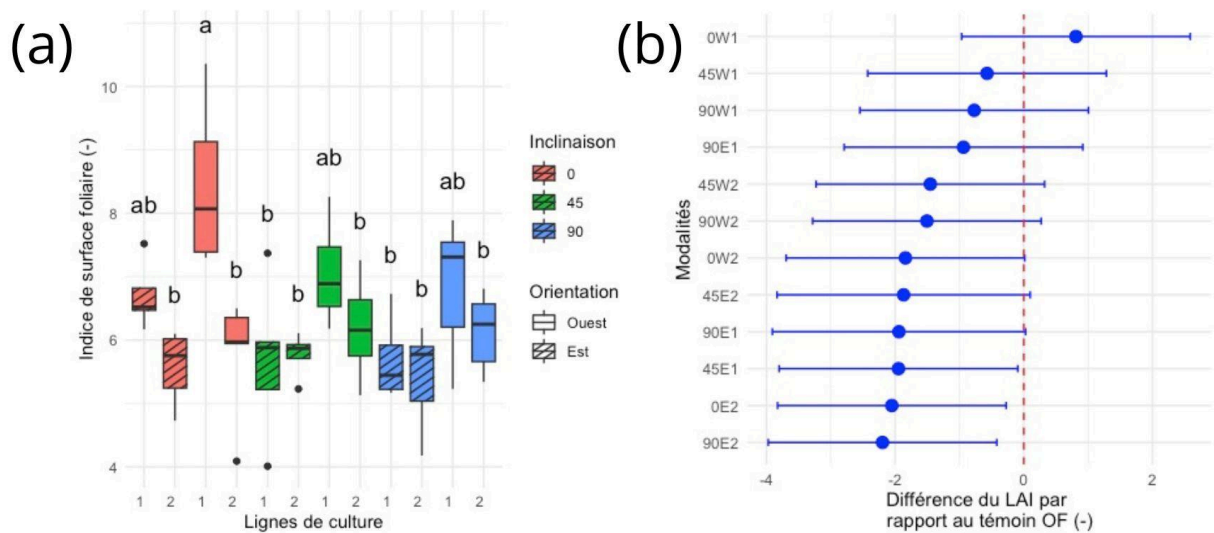


Figure 18 : Le graphique (a) illustre l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires (0°, 45° et 90°), de l'orientation des cultures (Est ou Ouest) et de la distance entre les cultures et les panneaux solaires (1 ou 2) sur l'indice de surface foliaire (LAI) des laitues. Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$). Le graphique (b) présente les différences de l'indice de surface foliaire (LAI) entre chaque modalité de culture et le témoin (OF), telles qu'estimées par le test de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Les lignes horizontales bleues représentent les intervalles de confiance des différences de moyennes et la ligne pointillée verticale rouge, la référence à zéro.

4.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les deux premières composantes principales (Dim1 et Dim2) expliquent respectivement 73,432 % et 17,337 % de la variance totale, soit un cumul de 90,769 % (figure 19). La troisième dimension (Dim3) n'explique que 5,846 % de la variance, et la quatrième, 3,386 % (Annexe 26).

La première composante principale (Dim1) est fortement corrélée aux variables biomasse fraîche et l'indice de surface foliaire. En revanche, la deuxième composante (Dim2) est influencée, mais dans une moindre mesure, par le nombre de feuilles et le pourcentage de biomasse sèche.

Cette ACP permet de visualiser des regroupements entre modalités : les modalités issues des dispositifs GH_PV (GH_33 et GH_50) sont isolées des autres sur la Dim2, traduisant un nombre de feuilles et pourcentage de biomasse sèche plus faible. Les modalités OF_E1 (culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques et sur la première ligne de culture) et OF_E2 (culture extérieure à l'est des panneaux photovoltaïques et sur la deuxième ligne de culture), bien que fortement dispersées, présentent le %Bs le plus élevé, mais une Bf et un LAI faibles. Les modalités OF et OF_W1 (culture extérieure à l'ouest des panneaux photovoltaïques et sur la première ligne de culture) se démarquent par des valeurs élevées sur la Dim1, indiquant une Bf et un LAI supérieurs. Enfin, les modalités GH et OF_E1 occupent une position plus centrale, traduisant un comportement intermédiaire par rapport aux autres modalités.

Enfin, les modalités GH et OF_E1 occupent une position plus centrale, traduisant un comportement intermédiaire par rapport aux autres modalités.

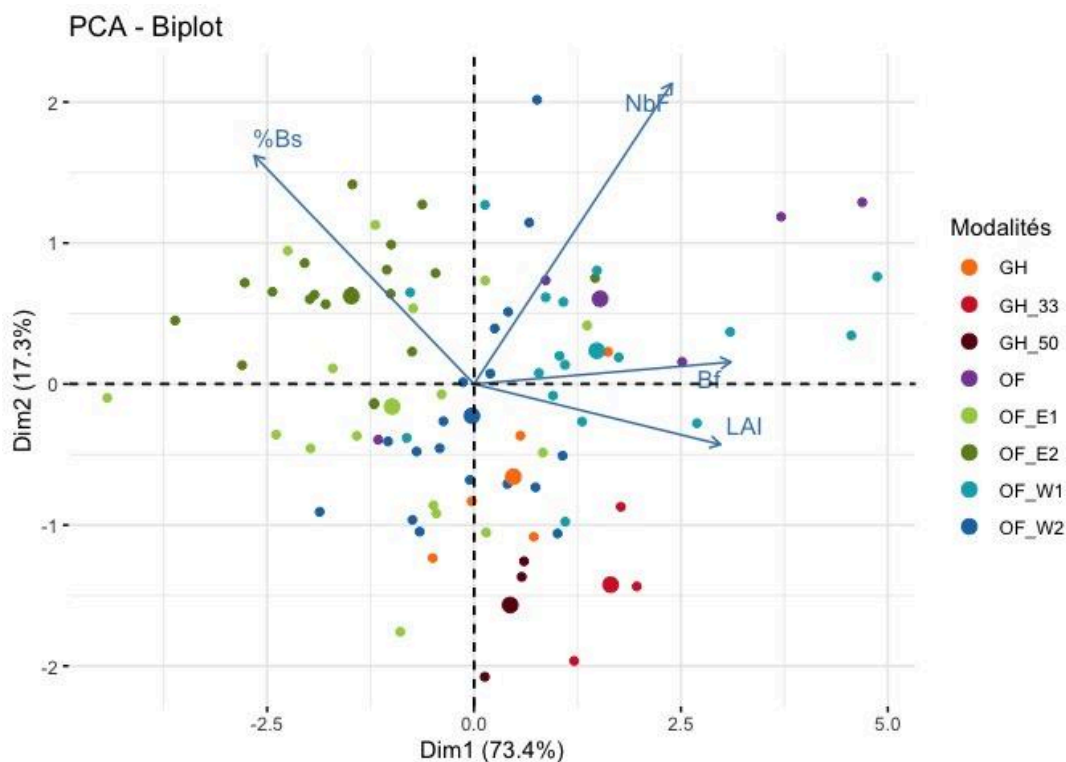


Figure 19 : Analyse en composantes principales réalisée à partir des variables : biomasse fraîche (Bf), pourcentage de biomasse sèche (%Bs), nombre de feuilles (NbF) et l'indice de surface foliaire (LAI). Les flèches bleues indiquent la contribution des variables aux deux premières dimensions principales (Dim1 et Dim2). Les points représentent les individus, colorés selon leur modalité de culture. Les points de plus grande taille correspondent à la moyenne de chaque modalité.

4.2. Production d'électricité

En raison de problèmes d'accès au serveur de stockage des données de production d'électricité, seules les données relatives aux modalités de culture en extérieur ont pu être traitées. Les données correspondant aux dispositifs installés sous serre n'ayant pas été accessibles, elles n'ont pas pu être analysées dans le cadre de ce travail.

Les résultats de production électrique des modalités de culture en extérieur sont présentés dans le tableau 5. On observe que les modalités OF_90 et OF_45 affichent des productions très proches, tandis que la modalité OF_0 présente des valeurs inférieures.

La figure 20 illustre la distribution journalière de la production d'électricité pour chaque inclinaison du dispositif OF lors d'une journée complètement ensoleillée (11 juin). Pour la modalité OF_0, correspondant à des panneaux positionnés à l'horizontale, la courbe présente un profil de production unimodal. Il convient de prendre en compte qu'il y a un décalage horaire de deux heures : les valeurs indiquées à 10h sur le graphique correspondent en réalité à celles mesurées à 8 h. La modalité OF_45, correspondant à une inclinaison de 45 ° vers l'ouest, se caractérise par une production faible jusqu'à environ 9 h du matin, suivie d'une forme en cloche avec un plateau atteignant 1,1 kWh. Enfin, la modalité OF_90, correspondant à une position verticale orientée est-ouest, présente un profil de production bimodal, avec une production matinale moins marquée que celle observée en après-midi, et un creux situé entre 12 h et 13 h.

Tableau 5 : Production d'électricité moyenne par jour et par panneau solaire sur toute la durée de production des laitues (08/05 au 20/06). Les modalités sont définies comme suit : OF_0, des panneaux solaires en position horizontale; OF_45, des panneaux solaires inclinés à 45 ° vers l'ouest et OF_90, des panneaux solaires en position verticale orientée est-ouest.

Modalité	Production électricité moyenne par panneau (KWh)	Production électricité moyenne par panneau et par jour (KWh)
OF_0	82,772	1,924
OF_45	103,001	2,395
OF_90	101,932	2,370

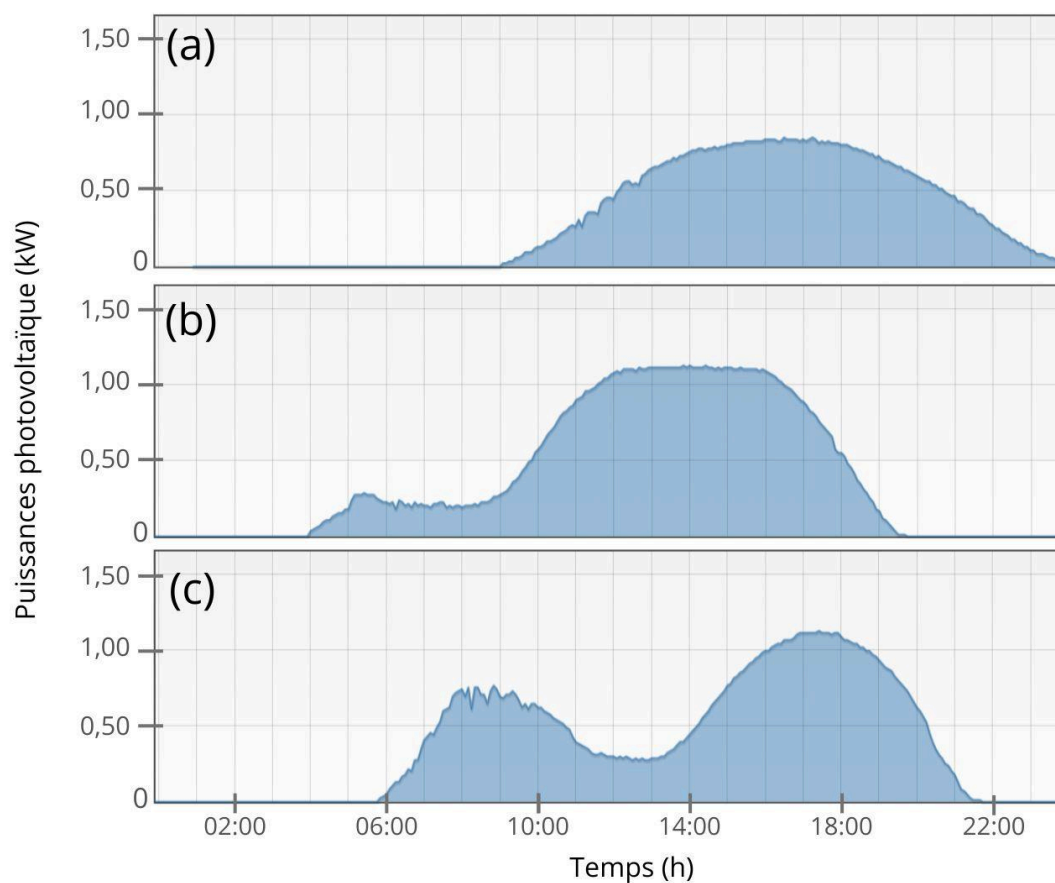


Figure 20 : Distribution journalière de la production d'électricité pour les inclinaisons (a) 0° , (b) 45° vers l'ouest et (c) 90° orientée est-ouest, lors d'une journée entièrement ensoleillée (11 juin). Pour le graphique (a), les données temporelles présentent un décalage de deux heures : les valeurs indiquées à 10 h correspondent en réalité à celles mesurées à 8 h.

4.3. Disponibilité lumineuse

Des problèmes techniques ont été rencontrés lors de la collecte des données issues des capteurs de lumière. En raison d'interruptions de la connexion internet, les données n'ont pas pu être enregistrées de manière continue sur l'ensemble de la période expérimentale. De plus, un accès limité au serveur de stockage a empêché la récupération complète des enregistrements, limitant l'accès à seulement 6 capteurs sur les 12 du dispositif OF_PV, et aucun pour les dispositifs OF, GH et GH_PV.

Face à ces contraintes, les analyses de disponibilité lumineuse ont été réalisées à partir de plusieurs sources de données (tableau 6). Ces données, exprimées en trois unités différentes (lux, $W \cdot m^{-2}$ et PPFD), ne couvrant pas les mêmes portions du spectre lumineux, ont nécessité l'application de facteurs de conversion. Certains de ces facteurs ont été estimés par comparaison directe entre les mesures, tandis que d'autres ont été obtenus à partir de la littérature (Apogee Instrum. 2025).

Tableau 6 : Liste des données de luminosité disponibles pour l'analyse de la disponibilité lumineuse.

	Données accessibles	Type de données
Capteurs OF_PV	0E2 : 24/05 - 10/06 0W1 : 23/05 - 10/06 0W2 : 29/05 - 10/06 45E1 : 24/05 - 10/06 90E1 : 24/05 - 10/06 90W1 : 23/05 - 10/06	Données de luminosité en LUX toutes les 15 min
Capteur station météo de WASABI	24/05 - 10/06	Données de luminosité en PPFD toutes les heures.
Station météo Agromet ²	08/05 - 20/06 (duré de l'expérience)	Données de luminosité en W/m^2 toutes les heures.
Modèle 3D	08/05 - 20/06 (duré de l'expérience)	Représentation 3D du dispositif OF_PV permettant de simuler l'ombre projeté des PV en fonction du jour et de l'heure
Capteur manuel	GH_PV + Extérieur : 102 donnés le 18/03/2025 GH + Extérieur : 10 donnés le 24/07/2025	Données de luminosité en PPFD.

L'objectif de cette partie était d'obtenir des graphiques illustrant la disponibilité lumineuse journalière ainsi que le DLI pour chaque modalité. Pour cela, plusieurs étapes ont été nécessaires :

² Réseau de stations météorologiques géré par le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W)

Pour dispositif OF_PV :

1. Détermination du nombre d'heures d'ombrage par modalité

Grâce à la modélisation 3D, la projection de l'ombre générée par les panneaux photovoltaïques a été reconstituée, pour chaque modalité. Cette modélisation a permis d'identifier précisément les périodes de la journée durant lesquelles les laitues sont soumises à l'ombrage. La durée d'ombrage a ensuite été convertie en pourcentage d'heures ombragées par jour (Tableau 7).

2. Vérification des résultats du nombre d'heures ombragées par modalité

Avec les données des capteurs OF_PV et celles de la station météo de WASABI, des graphiques de luminosité journalière sont générés. Pour faciliter l'identification des périodes d'ombrage, les graphiques de données de luminosité sont construits à partir des valeurs maximales enregistrées. Les données utilisées ont également été normalisées afin de faciliter la lecture des graphiques (figure 21 et annexe 27).

En comparant les durées d'ombrage déterminées avec le modèle 3D et celles par les capteurs, on remarque qu'elles ne sont pas équivalentes (Tableau 7).

Tableau 7 : Comparaison de la période de temps d'ombrage et du pourcentage d'ombrage par jour déterminée à l'aide du modèle 3D et des capteurs WASABI. Les cases vertes indiquent une concordance entre le modèle 3D et les capteurs WASABI, tandis que les cases rouges signalent des divergences.

Modalités	Période de temps d'ombrage	% d'heures ombragées par jour (%)	Période de temps d'ombrage	% d'heures ombragées par jour (%)
	Modèle 3D		Capteurs WASABI	
OF_0E1	12h53 - 16h53	23,53	NA	/
OF_0E2	15h10 - 17h57	16,37	18h00 - 19h45	4,41
OF_0W1	08h39 - 11h38	17,65	08h30 - 11h15	16,17
OF_0W2	07h50 - 9h38	10,59	07h45 - 09h30	10,29
OF_45E1	13h09 - 18h07	29,22	14h30 - 19h00	26,47
OF_45E2	14h48 - 19h03	25,00	NA	/
OF_45W1	09h38 - 10h13	3,43	NA	/
OF_45W2	08h05 - 08h47	4,12	NA	/
OF_90E1	14h02 - 18h00	23,33	15h30 - 20h00	26,47
OF_90E2	15h22 - 19h11	22,45	NA	/
OF_90W1	07h55 - 10h37	15,88	Non identifiable - 10h30	/
OF_90W2	06h44 - 09h36	16,86	NA	/

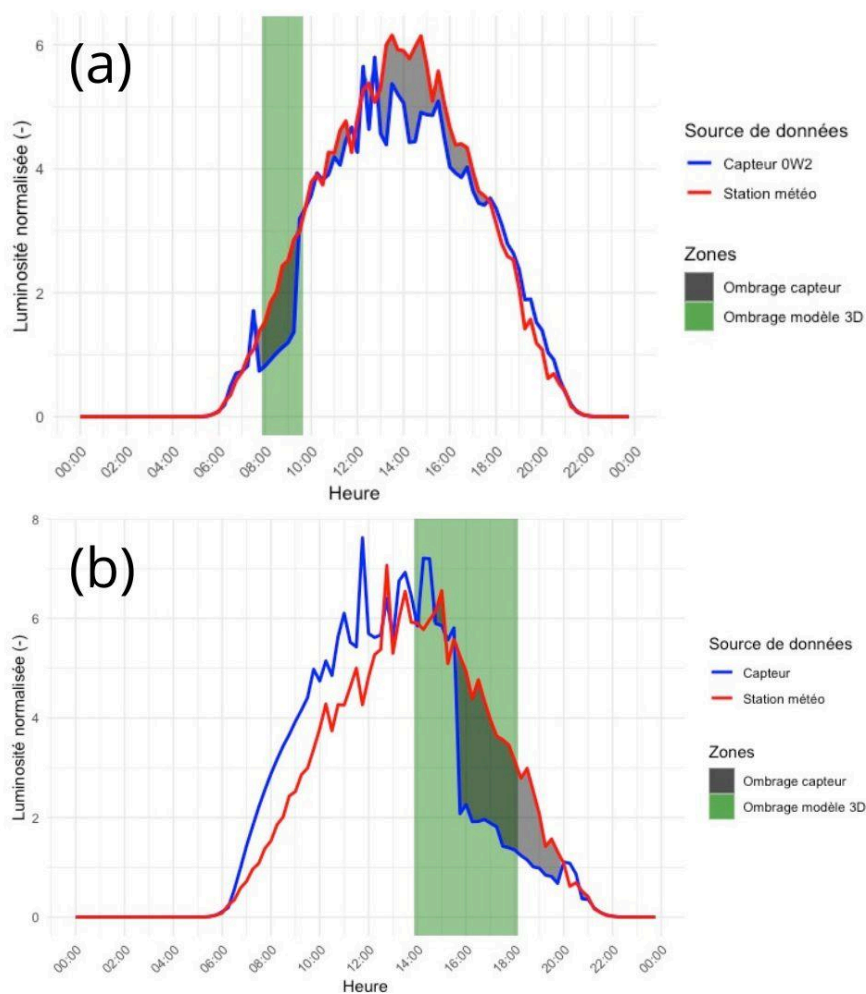


Figure 21 : Comparaison de la luminosité normalisée mesurée par les capteurs de WASABI (courbe bleue) et celle fournie par la station météo (courbe rouge) au cours de la journée. La zone verte indique la période d'ombrage estimée par le modèle 3D, tandis que la zone grise correspond à l'ombrage effectivement détecté par les capteurs.

3. Détermination de la quantité de lumière présente dans l'ombrage des PV

La quantité de lumière présente dans l'ombrage a été déterminée en comparant les données de la station météo et celles des capteurs lorsque ceux-ci étaient théoriquement sous ombrage. Les données prises sont celles du capteur 45E1 entre 15h et 18h. Les résultats montrent qu'il y a en moyenne une diminution de la luminosité de 40 % lors des périodes d'ombrage.

4. Détermination du pourcentage de réduction de lumière causé par la présence de panneaux photovoltaïques

En combinant les informations sur la période d'ombrage déterminée avec le modèle 3D et la diminution de la luminosité de 40 %, le pourcentage de réduction de lumière causé par la présence de panneaux photovoltaïques pour chacune des modalités a été calculé (figure 22).

Partie GH_PV :

Afin d'estimer le pourcentage d'ombrage reçu par les laitues dans les modalités sous serre, 112 mesures ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur de la serre les 18/03/2025 et 24/07/2025, à un moment de fort ensoleillement, sans couverture nuageuse. En comparant les données prises dans chacune des modalités avec l'extérieur, un ombrage de 18 % pour la serre plastique (0 %), de 47,70 % pour la modalité 33% et 56,60 % pour la modalité 50 %, a été déterminé.

5. Calcul du DLI

À partir des données du réseau Agromet, il est possible d'estimer le DLI moyen reçu par les laitues en l'absence d'ombrage. Les pourcentages de réduction de lumière, déterminés précédemment pour chaque modalité, ont ensuite été appliqués à ce DLI moyen afin d'estimer le DLI pour chaque modalité de culture. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 22 et détaillés en annexe 28.

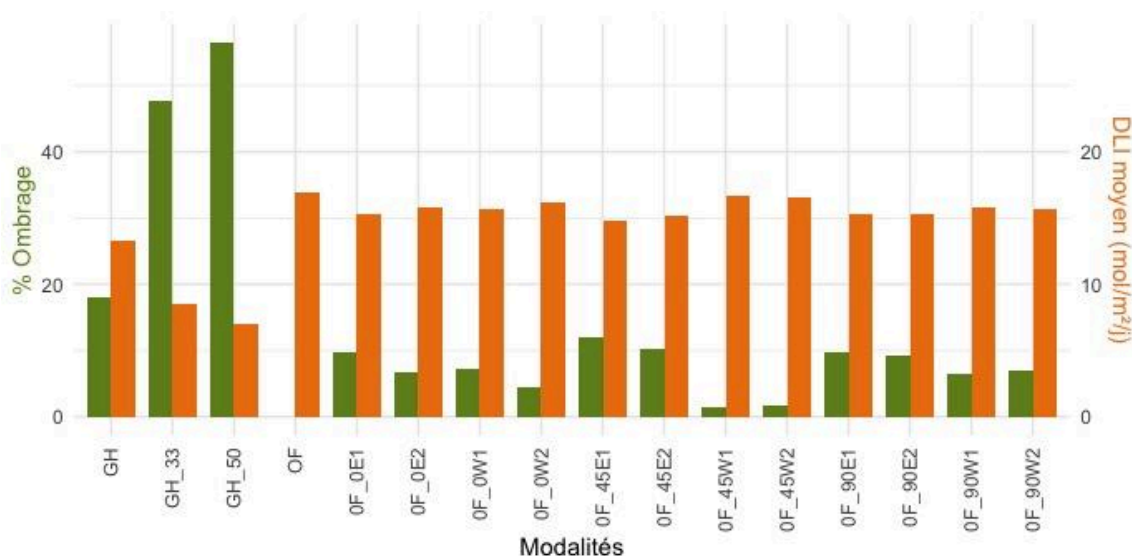


Figure 22 : Pourcentage d'ombrage (barres vertes, axe de gauche) et l'intégrale de lumière journalière (DLI) (barres orange, axe de droite) pour chacune des modalités expérimentales.

4.4. Données abiotiques

4.4.1. Capteurs de température, d'humidité et compteur d'eau

Outre les limitations mentionnées dans la section 4.3 relatives à la disponibilité lumineuse, d'autres difficultés ont été rencontrées. Les données abiotiques collectées par les capteurs de température et d'humidité du sol ainsi que de l'air se sont révélées inexploitable. En effet, elles présentaient des valeurs incohérentes, soit aberrantes, soit constantes sur toute la durée de l'expérimentation. Ces données n'ont donc pas été analysées et ne sont pas présentées dans ce travail.

Par ailleurs, les données issues des compteurs d'eau n'ont pas pu être utilisées en raison d'un retard d'installation, survenu trop tardivement pour cette expérimentation. Toutefois, il est possible d'affirmer que les laitues n'ont pas été soumises à un stress hydrique, celles-ci ayant été arrosées 4 fois par semaine de manière régulière.

4.4.2. Analyse du sol

Les résultats de l'analyse de sol sont présentés dans le tableau 8. Ils montrent que les zones analysées présentent globalement des caractéristiques similaires, avec des teneurs en phosphore, potassium et magnésium supérieures aux valeurs recommandées (voir annexe 29).

Tableau 8 : Résultat de l'analyse de sol effectuée le 01/05/25 par HEPH Condorcet sur la plateforme WASABI sur 3 dispositifs expérimentaux.

			Témoin extérieur	Serre PV	Serre plastique
Aspects texturaux (mesures par infrarouge proche)	CEC	meq/100g	10,8	10,7	8,8
	Argile	%	16,1	17,3	12,2
Statut acido-basique	pH eau		7,3	7,5	7,0
Statut organique (mesures par calcination et analyse des gaz)	C	%	3,2	3,7	3,7
	Humus	%	6,4	7,4	7,3
	N	‰	2,4	2,6	2,7
	C/N		13,4	14,5	13,7
Réserve échangeable (extraction à l'acétate d'ammonium EDTA - pH 4.65)	Pextr	mg/100g	18,5	16,1	11,5
	Kextr	mg/100g	102,5	86,2	88,2
	Mgextr	mg/100g	31,8	33,0	26,4
	Caextr	mg/100g	354,5	369,6	269,5
Salinité (extraction à l'acétate d'ammonium EDTA - pH 4.65)	Naextr	mg/100g	3,2	5,5	3,0

4.5. Efficacité d'utilisation du rayonnement (RUE)

Pour estimer la quantité de lumière interceptée par les laitues durant leur croissance (PARI), les pourcentages de réduction de lumière mesurés sous panneaux photovoltaïques (présentés à la figure 22) ont été appliqués aux données de rayonnement global issues de la station météo Agromet (tableau 6). Cette approche a permis d'obtenir une estimation du PARI pour chaque modalité, utilisée ensuite pour calculer l'efficacité d'utilisation de la lumière.

Une ANOVA a été réalisée sur 82 échantillons afin d'évaluer les différences significatives de RUE entre les différentes modalités de culture. Les conditions d'application des tests réalisés sont détaillées en annexe 30. Les résultats indiquent que la RUE est similaire pour toutes les modalités à l'exception des modalités sous serre PV (GH_33 et GH_50) présentant des valeurs de RUE significativement plus élevées que toutes les autres (figure 23). La modalité OF_90W1 se distingue également avec une RUE intermédiaire, significativement égale à la modalité GH_33.

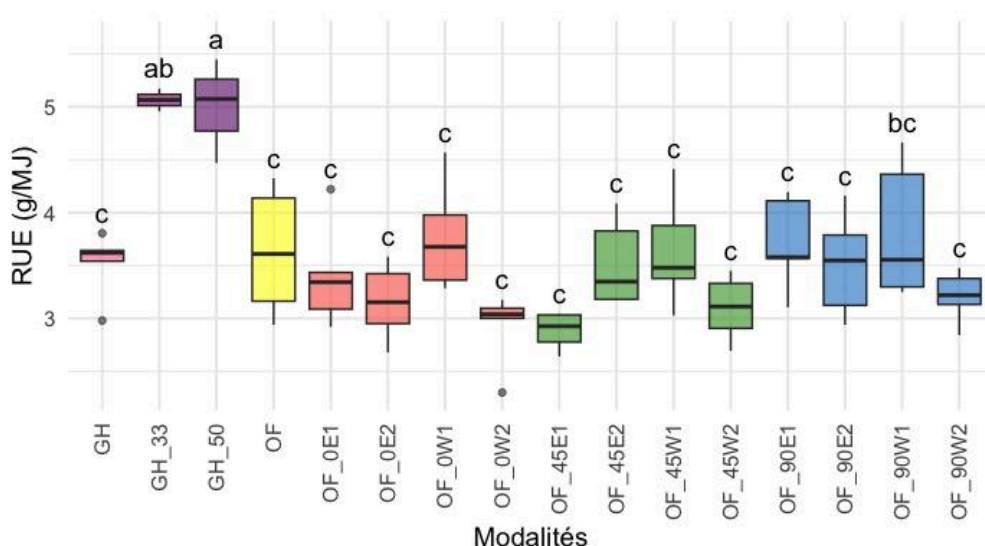


Figure 23 : Effet des modalités sur le Radiation Use Efficiency (RUE). Les modalités sont GH, GH_33, GH_50 pour les cultures sous serre, avec 0 %, 33 % ou 50 % de couverture photovoltaïque. OF pour cultures en extérieur, avec des panneaux photovoltaïques inclinés à 0 °, 45 ° ou 90 °, placés à l'est (E) ou à l'ouest (W), sur deux lignes de culture (1 = proche des panneaux, 2 = plus éloignée). Les lettres positionnées au-dessus des boîtes indiquent les groupes statistiquement distincts selon le test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

4.6. Corrélations au taux d'ombrage

Des droites de régression ont été établies entre le DLI moyen par modalité et, d'une part, la biomasse fraîche moyenne (figures 24.1a et 24.1b), d'autre part, le nombre moyen de feuilles par modalité (figures 24.2a et 24.2b). Les figures 24.1a et 24.2a prennent en compte uniquement les modalités en culture extérieure, tandis que les figures 24.1b et 24.2b incluent également les trois modalités sous serre.

Ces analyses montrent une corrélation faible entre la biomasse fraîche ou le nombre de feuilles et le DLI moyen, avec des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,419 et 0,031, particulièrement faibles lorsque les modalités sous serre sont intégrées.

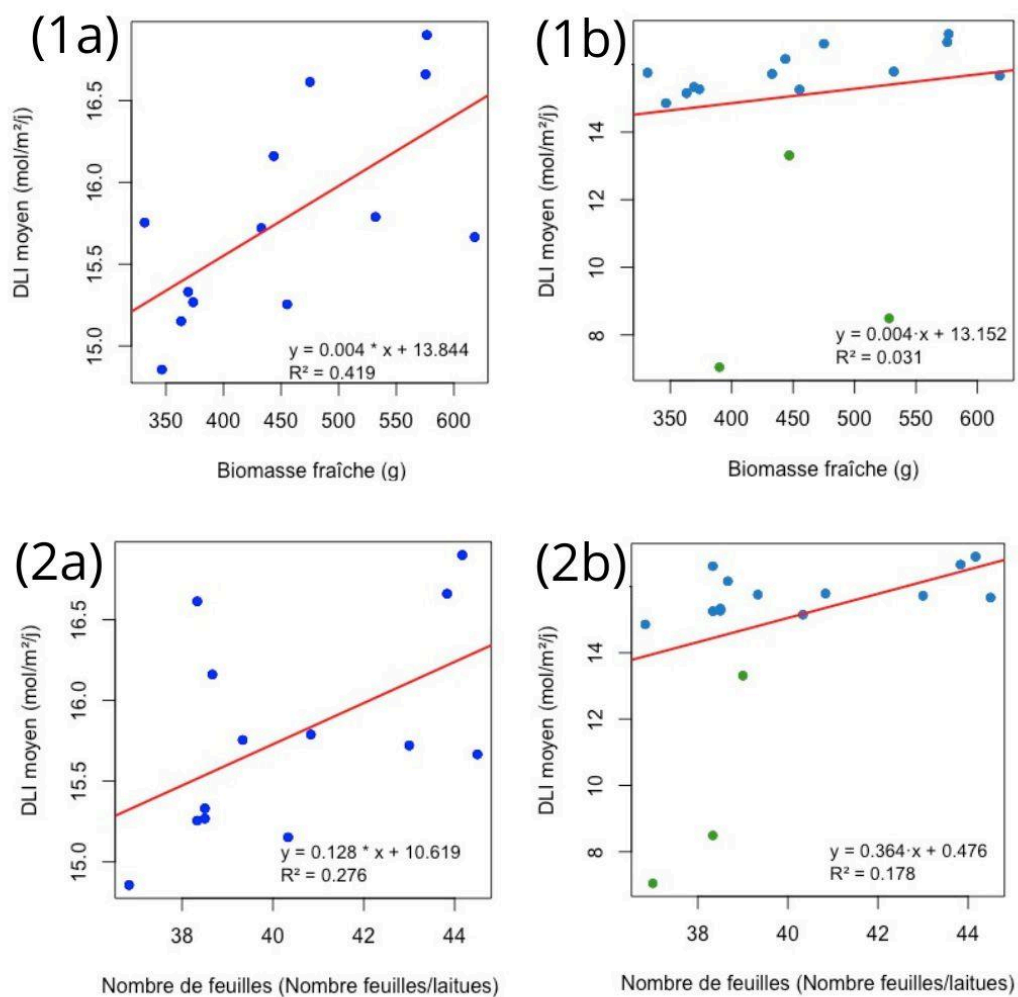


Figure 24 : Droites de régression établies entre le DLI moyen et la biomasse fraîche (1a et 1b), ainsi que le nombre de feuilles (2a et 2b). Les points verts correspondent aux trois modalités sous serre, tandis que les points bleus représentent les modalités en culture extérieure.

5. Discussion

5.1. Rendement agronomique

5.1.1. Dispositif sous serre (GH et GH_PV)

5.1.1.1. Critiques

Pour les analyses statistiques portant sur Bs, %Bs, NbF et LAI dans le dispositif GH et GH_PV, le nombre d'échantillons était à la fois faible et déséquilibré entre les trois modalités de couverture photovoltaïque (0 % : 6 échantillons ; 33 % et 50 % : 3 échantillons chacun). Ce déséquilibre s'explique par la configuration du dispositif GH_PV, composé de deux lignes de culture : l'une couverte de géotextile noir, l'autre non. Des différences marquées de rendements agronomiques ayant été observées entre ces deux lignes, seuls les échantillons issus de la ligne bâchée ont été conservés afin d'assurer l'homogénéité des pratiques culturales (l'ensemble des autres dispositifs étant également bâchés).

Bien que cette sélection ait conduit à un nombre réduit d'échantillons pour les modalités 33 % et 50 %, le test de Bartlett a confirmé l'homogénéité des variances pour chaque ANOVA (annexes 16 à 17), limitant ainsi le risque d'erreur statistique. Néanmoins, il convient de noter que certaines différences existant entre les modalités 33 % et 50 % pourraient ne pas avoir été détectées en raison de cette faible puissance statistique.

Par ailleurs, les lignes de culture de la modalité 0 % sont perpendiculaires aux modalités 33 % et 50 % (voir partie Matériel et méthode). Dans cette étude, cette différence d'orientation est considérée comme n'ayant pas d'impact direct sur les rendements, car l'effet d'ombrage de la serre plastique n'est pas dépendant de l'orientation du soleil.

5.1.1.2. Discussion des résultats

Biomasse fraîche

La modalité 33 % a produit les laitues à biomasse fraîche significativement plus élevée (511 ± 34 g/plant), devant les modalités 0 % (438 ± 39 g/plant) et 50 % (414 ± 32 g/plant), toutes dépassant les exigences de commercialisation définies par le Règlement (CEE) n° 79/88. Les rendements obtenus montrent qu'il est possible d'atteindre, voire de dépasser, ceux d'une serre plastique sans panneaux photovoltaïques. Dans cette étude, la récolte des laitues a été faite lorsque celles-ci présentaient un cœur ferme, ce qui les a conduites à une Bf importante. D'après Wallace et al. 2012, la durée de culture de la laitue sous serre et en extérieur varie fortement selon les conditions climatiques, ce qui explique le décalage de 9 jours entre les récoltes des modalités serre (GH) et extérieur (OF).

En s'appuyant sur les travaux de Gaudreau et al. 1994, qui montrent une augmentation de la biomasse fraîche des laitues entre 2,8 et $8,6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ de DLI, ainsi que ceux de Z. Yan et al. 2019, qui observent un effet similaire entre 5,0 et $15,1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$, la modalité 0 % ($13,311 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) aurait dû produire la plus forte Bf, suivie de 33 % ($8,490 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) puis 50 % ($7,045 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$). Or, cette tendance n'est pas confirmée par les résultats de cette étude, suggérant que d'autres facteurs que le DLI influencent la production. En l'absence de données abiotiques précises, seules des hypothèses peuvent être proposées à ce stade.

La différence entre les modalités 33 % et 50 % ne peut pas s'expliquer par des différences de température de l'air et du sol, d'humidité de l'air et du sol et des propriétés physicochimiques du sol, car elles sont situées dans la même serre et par conséquent sont soumises aux mêmes conditions. Dans ce cas, les différences de rendement seraient directement dues aux différences de DLI reçue lors de la culture.

En revanche, la modalité 0 % étant située dans une autre serre, les conditions de température, d'humidité et d'irrigation sont différentes de celles des modalités 33 % et 50 %. De plus, le sol y présente un historique différent : l'installation de la serre plastique est récente (avril 2025) et les lignes de culture précédentes étaient orientées perpendiculairement à celles utilisées dans cette étude. Cela pourrait avoir introduit une certaine hétérogénéité dans la structure du sol, difficilement observable par l'analyse du sol. Il serait donc probable que ce soit une différence de conditions abiotiques qui soit responsable de la différence de rendement et non la DLI.

Pourcentage de biomasse sèche

La modalité 0 % ($4,37 \pm 0,38$) se distingue par un pourcentage de matière sèche supérieur à celui des modalités 33 % et 50 % (respectivement $3,61 \pm 0,54$ et $3,75 \pm 0,55$). Selon Gavhane et al. 2023, le %Bs augmente avec le DLI, tandis que Kelly et al. 2020 précisent que cet effet est négligeable en dessous de $8,6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. Les résultats de cette étude confirment cette relation : la modalité 0 % ($13,311 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), seule à dépasser ce seuil, présente un %Bs plus élevé que les modalités 33 % ($8,490 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) et 50 % ($7,045 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$).

Nombre de feuilles

Selon Kelly et al. 2020, Sago 2016 et Kang et al. 2013 il existe bien une relation entre l'augmentation de DLI et celle du nombre de feuilles. Néanmoins, d'après Kelly et al. 2020 cet effet s'explique principalement par l'élévation de la température de la plante induite par des PPFD plus élevés, la température étant un facteur déterminant du développement foliaire. Dans le cas présent, les trois modalités étant situées en serre, la température de la plante dépend également des conditions d'aération propres à chaque serre. Ainsi, l'absence de différence significative dans le nombre de feuilles entre les modalités ne peut être attribuée à la lumière reçue.

Indice de surface foliaire

Les valeurs du LAI observées dans cette étude se sont révélées élevées, soulevant des interrogations quant à leur validité.

Une première hypothèse serait un dysfonctionnement du modèle d'estimation utilisé. Cependant, les performances de ce modèle semblent satisfaisantes, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,99 (Annexe 14).

Une autre explication plausible tient à la taille des laitues récoltées, atteignant 560 g, soit bien au-delà du calibre standard de commercialisation (200–300 g selon le Règlement (CEE) n° 79/88) (REGLEMENT (CEE) N° 79/88 1988). Un gabarit plus important peut conduire à un LAI plus élevé.

Par ailleurs, Baumbauer et al. 2019 rapportent qu'un accroissement linéaire du LAI est observé chez la laitue lorsque le DLI se situe entre 8 et 14 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$. Cette tendance n'a toutefois pas été constatée dans la présente étude. En effet, la modalité 0 %, qui présente le DLI le plus élevé (13,311 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$), est également celle affichant le LAI le plus faible ($7,54 \pm 0,99$). À l'inverse, les modalités 33 % (LAI : $8,81 \pm 1,28$; DLI : 8,490 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) et 50 % (LAI : $7,92 \pm 1,29$; DLI : 7,045 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) suivent une relation croissante entre DLI et LAI. Cette absence de linéarité pour la modalité 0 % pourrait, comme pour la biomasse fraîche, s'expliquer par des conditions abiotiques différentes, cette modalité ayant été cultivée dans une serre distincte de celle hébergeant les modalités 33 % et 50 %.

5.1.1.3. Conclusion

En l'absence de données abiotiques précises, il est impossible de démontrer l'homogénéité des conditions climatiques entre la serre plastique et la serre photovoltaïque. Par conséquent, d'autres facteurs que la seule réduction de la luminosité pourraient avoir influencé les rendements observés, rendant difficile l'isolement de l'effet spécifique de la lumière.

Malgré ces limites, les résultats de cette étude indiquent que la présence de panneaux photovoltaïques sur les serres peut avoir un impact positif sur les rendements agronomiques. En effet, les modalités 50 % présentent des rendements en biomasse fraîche et en indice de surface foliaire équivalents à ceux obtenus en serre plastique conventionnelle, tandis que les modalités 33 % affichent des performances supérieures. Ces résultats suggèrent que l'agrivoltaïsme en serre peut non seulement permettre une double utilisation du sol, mais également améliorer, dans certains cas, la production agricole.

Concernant le nombre de feuilles, la présence de panneaux photovoltaïques n'a pas d'effet significatif. En revanche, le pourcentage de biomasse sèche est plus élevé en serre conventionnelle qu'en serre PV.

5.1.2. Dispositif de culture extérieure (OF et OF_PV)

5.1.2.1. Critiques

Les conditions d'application des analyses statistiques de Bf n'ont pas été strictement respectées (p -valeur $< 0,05$), comme l'indiquent les résultats des tests de Shapiro-Wilk et de Bartlett (annexe 21). Toutefois, selon Yang et Berdine 2021, ces tests sont particulièrement sensibles aux grands échantillons, ce qui est le cas ici ($n = 391$). Les auteurs recommandent, dans ce contexte, d'avoir recours à une évaluation visuelle des résidus. La normalité et l'homoscédasticité ont ainsi été jugées acceptables sur cette base.

Par ailleurs, les modalités sont considérées ici comme comparables en termes de conditions abiotiques (température, humidité de l'air et du sol) et de caractéristiques pédologiques, en raison d'un historique de culture commun et d'une localisation identique. La luminosité est donc considérée comme le principal facteur explicatif des différences de rendement observées.

5.1.2.2. Discussion des résultats

Biomasse fraîche

Sheikhi et al. 2024 ont montré qu'une augmentation du DLI entre 8,64 et 17,28 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$ entraîne une augmentation de la biomasse fraîche. Une relation positive entre Bf et DLI est observée ici (figure 24.1a), bien que modérée ($R^2 = 0,419$), ce qui suggère l'influence d'autres facteurs.

L'un d'eux pourrait être le moment de l'ombrage. Les modalités orientées à l'Ouest, exposées à l'ombre le matin, présentent des Bf plus élevées que celles à l'Est, où l'ombrage intervient pendant les heures les plus chaudes. Palsha et al. 2024 ont par ailleurs montré que l'augmentation du PPFD entre 201 et 413 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a un effet positif sur la biomasse, indépendamment du DLI, ce qui est cohérent avec les résultats observés : les modalités à l'Ouest ayant donc reçu des pics de PPFD plus élevés présentent une biomasse plus importante.

Cependant, comme détaillé dans le tableau 7 et discuté en section 4.3 Disponibilité lumineuse, il n'a pas été possible de déterminer précisément les heures de début et de fin d'ombrage pour chaque modalité, empêchant une analyse fine de leur synchronisation avec les pics d'ensoleillement.

Enfin, le test de Dunnett (figure 16.1b) indique que la majorité des modalités ne diffèrent pas significativement d'une culture de laitue en extérieur sans panneaux photovoltaïques, à l'exception de 0E2 (production significativement inférieure) et de 0W1 et 45W1 (productions significativement supérieures). Ce résultat est encourageant, car il montre qu'il est possible de maintenir, voire d'améliorer le rendement en laitues tout en intégrant une production d'électricité.

Pourcentage de biomasse sèche

Comme mentionné dans les résultats, une dichotomie nette est observée entre les modalités Est et Ouest, les premières présentant globalement un %Bs plus élevé, à l'exception de la modalité 0E1. Ce résultat va à l'encontre des attentes fondées sur la littérature scientifique.

En effet, les modalités Ouest affichent un DLI moyen de $16,102 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ et sont exposées à des PPFD élevés pendant les heures chaudes, tandis que les modalités Est, avec un DLI moyen plus faible ($15,269 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), bénéficient d'un ombrage pendant les pics lumineux. Or, Kelly et al. 2020 montrent qu'un DLI croissant de $10,368$ à $15,552 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ entraîne une augmentation du %Bs entre 39 % et 55 % selon les variétés. De même, Palsha et al. 2024 rapportent une hausse de 27,8 % du poids sec avec une augmentation du PPFD de 201 à $413 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, à DLI constant.

Par ailleurs, les résultats du test de Dunnett indiquent que toutes les modalités Est, sauf 0E1, présentent un %Bs significativement supérieur à celui des laitues cultivées en extérieur sans panneaux photovoltaïques. Cela suggère que la présence d'un ombrage pendant les heures les plus chaudes de l'après-midi pourrait favoriser l'accumulation de matière sèche.

Nombre de feuilles

Comme indiqué précédemment, plusieurs études (Kang et al. 2013; Kelly et al. 2020; Sago 2016) suggèrent une relation positive entre le DLI et le nombre de feuilles. Dans cette étude, bien qu'un lien similaire soit observé (figure 24.2a), la corrélation reste très faible ($R^2 = 0,276$). Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette tendance modérée.

Premièrement, les écarts de DLI entre modalités sont relativement faibles (entre $14,856$ et $16,901 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), alors que les études mentionnées portaient sur des différences plus marquées, de l'ordre de $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$, susceptibles d'avoir un effet plus net sur le développement foliaire.

Deuxièmement, un biais lors de la récolte pourrait avoir affecté la fiabilité des résultats. La dernière feuille était définie comme celle mesurant 1 cm de longueur. L'absence d'outils de mesure standardisés et l'intervention de sept personnes différentes pour l'effeuillage ont conduit à une variabilité inter-opérateur qui pourrait engendrer une marge d'erreur estimée à 3–4 feuilles, ce qui n'est pas négligeable dans une plage de valeurs moyenne allant de 36 à 45 feuilles.

Enfin, le test de Dunnett (figure 17.b) révèle que 6 modalités sur 12 (90E1, 0E1, 0W2, 90E2, 45W2 et 45E1) présentent un nombre de feuilles significativement inférieur à celui observé en extérieur sans panneaux photovoltaïques. Ces effets négatifs semblent plus marqués à l'Est, suggérant un impact possible des panneaux sur le développement foliaire dans certaines configurations d'ombrage.

Indice de surface foliaire

Bien que entre Bf et LAI, les résultats des tests de tukey ne donnent pas les mêmes différences significatives entre modalités, les valeurs de LAI suivent globalement la même tendance que la biomasse fraîche. À l'Ouest, des différences marquées sont observées entre les lignes 1 et 2, quelle que soit l'inclinaison, avec un maximum atteint pour la modalité 0W1. À l'Est, les lignes 1 et 2 présentent des valeurs similaires, à l'exception notable de la modalité 0E1.

Ces observations suggèrent une corrélation entre le LAI et la biomasse, comme cela a été démontré par Petcu et al. 2001 pour le blé d'hiver. Une telle relation pourrait être exploitée pour estimer plus simplement le LAI à partir de la biomasse fraîche dans le cas de la laitue.

Par ailleurs, le test de Dunnett indique que la majorité des modalités présentent un LAI comparable à celui observé en culture extérieure sans panneaux photovoltaïques, à l'exception des modalités 45E1, 0E2 et 90E2, qui s'en distinguent significativement, avec des valeurs de LAI inférieures à celles du témoin.

5.1.2.3. Conclusion

Les résultats obtenus pour la modalité 0E1, notamment en termes de Bf, %Bs et LAI, s'écartent des tendances générales observées, voire contredisent certaines conclusions de l'étude. Cela suggère l'intervention d'un facteur externe non contrôlé ayant pu affecter cette modalité de manière isolée.

La présence de panneaux photovoltaïques influence les rendements agronomiques des laitues. Toutefois, l'inclinaison des panneaux semble avoir un effet limité. C'est davantage la combinaison orientation-distance qui influence les performances. Il apparaît donc pertinent de choisir l'inclinaison des PV optimisant la production électrique.

La biomasse fraîche produite sous PV est, dans la plupart des cas, équivalente à celle d'une culture de extérieur sans PV. Certaines modalités, telles que 0W1 et 45W1, présentent des rendements supérieurs, ce qui en fait des configurations à privilégier. Le LAI reste globalement comparable à celui observé sans ombrage photovoltaïque. Les modalités orientées à l'Est présentent généralement un %Bs plus élevé et un nombre de feuilles inférieur à ceux mesurés en culture extérieure sans PV, suggérant un effet possible de l'ombrage durant les heures les plus chaudes de la journée.

5.1.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Dans la figure 19, les 12 modalités OF_PV ont été regroupées en 4 catégories selon l'orientation et la distance entre les lignes de culture, en excluant l'inclinaison des panneaux photovoltaïques, considérée comme ayant un effet négligeable sur les variables étudiées. Cette approche a permis d'obtenir une représentation graphique plus lisible et de mettre en évidence les tendances propres à chaque modalité.

L'objectif principal de cette ACP est de comparer les modalités GH et OF. Bien que synthétique, cette représentation intègre les principales observations discutées dans ce travail.

Malgré une durée de culture plus longue de neuf jours pour les modalités OF, la projection sur la Dim1 montre peu de différences entre les modalités sous serre (GH, GH_33, GH_50) et celles en extérieur à l'ouest. Cela suggère des performances similaires en termes de biomasse fraîche et de LAI.

En revanche, une hiérarchie apparaît pour le %Bs, avec des valeurs plus faibles en serre, intermédiaires pour les modalités OF à l'ouest, et plus élevées à l'est. Cela suggère que, malgré une Bf et un LAI comparables, les laitues cultivées en serre présentent un pourcentage de biomasse sèche inférieure.

5.2. Production d'électricité

Les résultats présentés dans le tableau 5 indiquent que la modalité OF_0 présente une production d'électricité (82,772 kWh) inférieure à celles des modalités OF_45 (103,001 kWh) et OF_90 (101,932 kWh). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que, comme l'ont montré Gostein et al. 2013, les panneaux photovoltaïques installés à l'horizontale ont tendance à accumuler davantage de poussières et de débris végétaux, ce qui peut réduire leur rendement électrique de 3 à 14 %. Une accumulation de salissures a effectivement été observée sur le terrain, comme l'illustre l'annexe 31.

La forme des courbes journalières obtenues pour les inclinaisons 0 ° et 90 ° est conforme aux observations rapportées dans la littérature (Kopecek et Libal 2021), avec un profil unimodal pour 0 ° et bimodal pour 90 °. Selon Khan et al. 2017, ces deux configurations sont complémentaires pour assurer une production d'électricité constante toute au long de la journée, l'inclinaison verticale (90 °) favorisant la production en matinée et en fin de journée, périodes correspondant généralement aux pics de consommation domestique.

Concernant l'inclinaison à 45 ° vers l'ouest, à notre connaissance aucune étude préalable n'a porté sur ce dispositif, ce qui rend toute comparaison directe avec la littérature impossible. Il est néanmoins notable que sa production soit très proche de celle observée pour OF_90 (tableau 5), alors même qu'il ne s'agit pas de la configuration théoriquement la plus performante. En effet, Jang et Lee 2020 indiquent qu'une inclinaison vers le sud optimise mieux la production que la position verticale.

5.3. Disponibilité lumineuse

Comme mentionné dans la section Résultats, des contraintes techniques ont empêché l'accès complet aux données issues des capteurs de luminosité. Par conséquent, plusieurs approximations ont été nécessaires pour estimer la DLI de chaque modalité. Les incertitudes liées à ces estimations sont détaillées ci-dessous.

Premièrement, une divergence a été observée entre les heures de début et de fin d'ombrage journalières estimées via le modèle 3D et celles enregistrées par les six capteurs opérationnels (tableau 7). Cette différence pourrait s'expliquer par une topographie locale non intégrée dans le modèle 3D. En effet, ce dernier ne prend en compte qu'une pente uniforme de 2 ° orientée vers le nord. Or, à l'est du dispositif, une pente supplémentaire orientée vers l'est est suspectée. Cela expliquerait que les ombrages mesurés par les capteurs 0E2, 45E1 et 90E1 soient plus tardifs que ceux prédits par le modèle 3D. À l'ouest, les estimations du modèle et des capteurs étant cohérentes, aucune pente additionnelle n'est supposée. Des mesures sur le terrain seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Deuxièmement, l'atténuation de la luminosité de l'ombre créée par les panneaux photovoltaïques a été estimée à 40 %, sur la base des mesures du capteur 45E1 entre le 24 mai et le 10 juin, sur la plage horaire de 15 h à 18 h. Cette estimation ne prend cependant pas en compte les variations météorologiques vécues durant toute la période de culture. Par exemple, en conditions brumeuses, la lumière étant plus diffuse, la réduction lumineuse pourrait être bien inférieure. De plus, l'utilisation d'un seul capteur empêche de considérer des effets potentiels de réflexion lumineuse créés par les panneaux et donc de variation d'atténuation lumineuse en fonction de l'inclinaison des PV. Ensuite, il n'a pas été prouvé que cette valeur de 40 % de réduction lumineuse est constante tout au long de la journée.

Enfin, comme indiqué dans le tableau 6, les données utilisées proviennent de capteurs mesurant la lumière dans des unités différentes (W/m^2 , lux, PAR), qui ne couvrent pas toutes les mêmes longueurs d'onde du spectre lumineux. Pour les rendre comparables, des facteurs de conversion issus de la littérature ou estimés manuellement ont été appliqués, ce qui constitue une source d'incertitude supplémentaire.

5.4. Données abiotiques

Comme indiqué à plusieurs reprises dans ce travail, l'accès aux données issues des capteurs abiotiques (température de l'air et du sol, humidité de l'air et du sol) n'a pas été possible. Cette limitation a conduit à remettre en question le dispositif de collecte des données. Deux points majeurs ressortent de cette expérience.

Premièrement, cette expérience a permis de mettre en lumière l'importance de vérifier régulièrement, tout au long de l'expérimentation, le bon fonctionnement des capteurs, ainsi que l'accessibilité et la cohérence des données enregistrées.

Deuxièmement, la dépendance vis-à-vis d'organismes tiers, internes ou externes à la faculté, pour l'accès aux données, a considérablement compliqué la résolution des problèmes techniques. Une solution serait de viser une autonomie maximale dans la gestion des données. Un calcul simple montre que le stockage local serait techniquement envisageable :

En supposant un enregistrement toutes les 15 minutes de cinq paramètres (luminosité, température de l'air, température du sol, humidité de l'air, humidité du sol) pour 16 capteurs, chaque valeur étant codée sur 32 bits, le volume par enregistrement serait de 2 560 bits. Sur une durée de 43 jours, cela représente 4 128 enregistrements, soit environ 10,57 Mbits ($\approx 1,3$ Mo), équivalent à l'espace qu'occupe une trentaine de secondes de musique. Ce volume modeste pourrait aisément être stocké sur une carte SD intégrée aux capteurs, à récupérer périodiquement, évitant ainsi les contraintes liées aux systèmes Wi-Fi ou filaires ou d'accès aux serveurs.

5.5. Efficacité d'utilisation du rayonnement

La RUE est un indicateur calculé à partir du LAI et du PAR_i . Ces deux variables ont été estimées et non directement mesurées (voir sections 4.3 Disponibilité lumineuse), une marge d'erreur est à considérer.

Nos résultats vont à l'encontre de ceux rapportés dans la littérature. D'après Jin et al. 2023, une méta-analyse comparant la RUE des laitues cultivées en serre et en extérieur, montre que les cultures sous serre présentent en moyenne une RUE plus élevée. Or, dans la figure 23, on observe que la modalité GH, correspondant à une serre plastique, présente une RUE statistiquement similaire à celle des cultures en extérieur. Cette divergence pourrait s'expliquer par le fait que la méta-analyse repose probablement sur des données issues de serres à environnement contrôlé (chauffage, éclairage, atmosphère régulée...), ce qui n'est pas précisé dans l'article.

Par ailleurs, les laitues cultivées sous les modalités GH_33 et GH_50 se distinguent par une RUE plus élevée (figure 22). Ces résultats confirment que l'utilisation de la lumière par les laitues varie selon les conditions de culture, et qu'il n'existe pas de relation linéaire directe entre la quantité de lumière disponible et la production de biomasse sèche.

6. Conclusion et perspective

6.1. Conclusion

Les résultats de cette étude ne peuvent être généralisés sans précaution, car une seule année d'expérimentation ne permet pas de prendre en compte la variabilité interannuelle des conditions climatiques. Des essais répétés sur plusieurs années seraient nécessaires pour confirmer les tendances observées.

Néanmoins, plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette première analyse. Tout d'abord, la présence de panneaux photovoltaïques, que ce soit en extérieur ou en serre, ne réduit pas significativement la biomasse fraîche des laitues, et peut même l'améliorer dans certaines configurations. C'est notamment le cas pour une couverture PV de 33 % en serre, ainsi que pour des cultures en extérieur positionnées à l'ouest des panneaux, distance de 1,5 m, sous des inclinaisons de 0 ° ou 45 °.

Concernant le pourcentage de biomasse sèche, la présence de PV en serre tend à réduire cette variable, sans différence significative entre les taux de couverture de 33 % et 50 %. Tandis qu'en extérieur, les modalités situées à l'est des panneaux présentent un %Bs plus élevé qu'une culture témoin sans PV, tandis qu'aucune différence n'a été observée à l'ouest.

Le nombre de feuilles n'est pas affecté par la présence de PV en serre. En revanche, en culture extérieure, un effet négatif est observé pour six modalités sur douze, principalement celles exposées à l'est des panneaux. Pour l'indice de surface foliaire, les tendances sont similaires à celles observées pour la biomasse fraîche, tant en serre qu'en extérieur.

L'analyse en composantes principales a permis de mettre en évidence des similarités de comportement entre les cultures en serre et celles en extérieur à l'ouest, pour la Bf et le LAI. Une hiérarchie claire apparaît pour le %Bs : valeurs les plus faibles en serre, intermédiaires à l'ouest, et les plus élevées à l'est des panneaux.

En ce qui concerne la production d'électricité, elle est identique entre les PV inclinés à 45 ° vers l'ouest et ceux en position verticale. Pour la position horizontale, la production d'électricité est plus faible, probablement causée par l'accumulation de salissures sur les PV. Les données de production d'électricité de la serre n'étant pas accessibles, elles n'ont pas pu être analysées.

Pour finir, l'analyse de l'efficacité d'utilisation du rayonnement montre une efficacité similaire entre les modalités en extérieur et la serre plastique. Seules les modalités en serre PV (33 % et 50 %) se démarquent par une meilleure utilisation de la lumière, produisant une biomasse équivalente à celle en extérieur malgré une luminosité significativement réduite.

En conclusion, cette étude montre qu'il est possible de produire des laitues *Amaroza* dans un système agrivoltaïque avec des rendements comparables à ceux obtenus en production sans panneaux photovoltaïques, tout en générant simultanément de l'électricité. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'agrivoltaïsme comme solution intégrée pour concilier production agricole et production énergétique. Toutefois, de nombreuses pistes d'amélioration et d'approfondissement restent à explorer, comme détaillé dans la section Perspectives ci-dessous.

6.2. Perspectives

Les perspectives suivantes constituent une liste non exhaustive d'éléments pouvant être intégrés à cette étude pour en approfondir l'analyse :

Suivi de la biomasse fraîche au cours du temps

Une étude de l'évolution de la Bf en fonction du temps pour chaque modalité permettrait d'identifier la durée de culture optimale pour atteindre les calibres commerciaux définis par le Règlement (CEE) n° 79/88. Cela contribuerait à optimiser les cycles de production en réduisant la durée de culture, permettant ainsi d'augmenter le nombre de cycles sur une même période et donc la productivité globale.

Le ratio d'équivalent-terre

Le calcul du ratio d'équivalent-terre (Land Equivalent Ratio, LER) aurait été pertinent dans le cadre de cette étude, car il permet de comparer la productivité d'un système agrivoltaïque à celle des activités de production agricole et d'électricité réalisées séparément sur des surfaces distinctes (Oyejola et Mead 1982). Cet indicateur offre ainsi un moyen d'évaluer si l'agrovoltisme présente une productivité supérieure à celle obtenue par la culture de laitues seule ou la production photovoltaïque seule.

Analyses organoleptiques et chimiques

La réalisation de tests organoleptiques et d'analyses chimiques sur les laitues issues des différentes modalités permettrait de déterminer s'il existe des différences de qualité sensorielle ou nutritive. Ces résultats pourraient ensuite être mis en relation avec les variables mesurées dans cette étude, enrichissant l'évaluation globale des performances des différents systèmes.

Épaisseur foliaire

D'après Evans et Poorter 2001, les plantes cultivées sous faible luminosité développent des feuilles plus fines. Il serait pertinent de vérifier si cette tendance se retrouve dans cette étude, en mesurant l'épaisseur foliaire. Ces données pourraient ensuite être croisées avec les résultats d'éventuels tests organoleptiques afin d'évaluer son impact sur les préférences des consommateurs.

Analyse économique

Une étude économique comparative serait nécessaire pour évaluer la rentabilité des différentes modalités. Il serait en effet pertinent de déterminer quelle modalité présente la rentabilité économique la plus intéressante, en prenant en compte la production agronomique, la production d'électricité, l'investissement initial, ainsi que les coûts d'entretien et de main-d'œuvre.

Nouvelle méthode d'estimation du LAI

Comme mentionné à plusieurs reprises dans ce travail, le LAI a été estimé en mesurant la longueur et la largeur d'une feuille sur huit par laitue. Toutefois, les résultats obtenus suggèrent une forte similarité entre la biomasse fraîche et le LAI, que ce soit en dispositif sous serre ou en extérieur. Cette observation laisse entrevoir une potentielle corrélation entre ces deux variables. Une étude approfondie de cette relation permettrait d'en évaluer les limites et d'envisager l'utilisation de la Bf comme indicateur indirect du LAI pour cette variété de laitue, facilitant ainsi son estimation.

Optimisation du modèle 3D

Comme évoqué dans la discussion, une étude plus fine de la topographie du terrain du dispositif OF_PV permettrait de vérifier l'hypothèse d'une inclinaison supplémentaire orientée vers l'est. Le modèle 3D pourrait alors être ajusté en conséquence, afin de fournir des estimations plus cohérentes avec les mesures réalisées sur le terrain.

7. Description de la contribution personnelle de l'étudiante

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, j'ai été pleinement impliquée dans les différentes étapes de l'étude, depuis le travail de terrain jusqu'à l'analyse statistique des résultats. J'ai participé aux opérations de plantation, entretien, récolte, séchage et pesée des laitues, tant pour mon propre travail que pour des expérimentations parallèles menées dans le cadre d'autres projets.

J'ai adapté un protocole expérimental existant aux objectifs spécifiques de ce TFE. Les infrastructures étant déjà en place, il a fallu en comprendre les caractéristiques, en identifier les contraintes, puis en ajuster l'organisation pour qu'elles répondent de manière pertinente à la question de recherche.

J'ai également conçu et mis en place une étude complémentaire visant à établir une relation allométrique entre les dimensions des feuilles de laitue et leur LAI. Cette étude a été rendue possible grâce à la réalisation d'une culture de laitue en hydroponie. À partir de ces données, j'ai développé un modèle permettant d'estimer le LAI d'une laitue entière à partir de la mesure de la longueur et de la largeur d'une feuille sur huit. Ce modèle ouvre la voie à une méthode de mesure simplifiée du LAI, utile pour les futures études menées au sein du laboratoire de phytopathologie.

Sur le plan organisationnel, j'ai coordonné et géré les récoltes de laitues issues de vingt modalités de culture différentes, dont certaines faisaient partie de mon étude personnelle, tandis que d'autres relevaient d'expérimentations externes.

L'ensemble des traitements statistiques présentés dans ce mémoire ont été réalisés par moi-même : analyses de variance (ANOVA), tests de comparaisons multiples (Tukey et Dunnett), analyses en composantes principales (ACP) et régressions linéaires.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de plus grande envergure, qui évalue l'agrivoltaïsme en serre sur des cultures maraîchères et dans trois sites belges (Gembloux, Ath et Mons). Il s'inscrit également dans un second projet portant sur la comparaison des paramètres physico-chimiques et organoleptiques de la laitue dans 5 systèmes de cultures d'agriculture urbaine (aquaponie, hydroponie, pleine terre sous serre, pleine terre sous serre photovoltaïque et pleine terre extérieure).

Ce travail pourra faire l'objet de valorisations scientifiques afin de participer aux avancées de ces différents domaines de recherche agronomique.

8. Bibliographie

- Adeh, Elnaz H., Stephen P. Good, M. Calaf, et Chad W. Higgins. 2019. « Solar PV Power Potential Is Greatest Over Croplands ». *Scientific Reports* 9 (1): 11442. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>.
- Agrosemens. s. d. « Semences bio LAITUE AMAROZA ». Consulté le 11 mars 2025. <https://www.agrosemens.com/jardin-graine-bio-laitue-laitue-batavia-plein-champ/3044-laitue-amaroza.html>.
- Al-Said, F., P. Hadley, S. Pearson, M.M. Khan, et Q. Iqbal. 2018. « Effect of high temperature and exposure duration on stem elongation of iceberg lettuce ». *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 55 (1): 95-101. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.6554>.
- Anusuya, K., K. Vijayakumar, M. Leenus Jesu Martin, et S. Manikandan. 2024. « Agrophotovoltaics: Enhancing Solar Land Use Efficiency for Energy Food Water Nexus ». *Renewable Energy Focus* 50 (septembre): 100600. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100600>.
- Apogee Instruments. 2025. « PPFD to Lux Conversion ». <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/>.
- Appelbaum, J. 2016. « Bifacial photovoltaic panels field ». *Renewable Energy* 85 (janvier): 338-43. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.050>.
- Armstrong, Alona, Nicholas J Ostle, et Jeanette Whitaker. 2016. « Solar Park Microclimate and Vegetation Management Effects on Grassland Carbon Cycling ». *Environmental Research Letters* 11 (7): 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.
- Atallah, Jad, Pierre Rahme, et Jimmy S. Issa. 2025. « Comparative assessment of single axis manual solar PV trackers: A case study for agricultural applications ». *Energy Conversion and Management: X* 26 (avril): 100927. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100927>.
- Badran, Ghadeer, et Mahmoud Dhimish. 2024. « Comprehensive Study on the Efficiency of Vertical Bifacial Photovoltaic Systems: A UK Case Study ». *Scientific Reports* 14 (1): 18380. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68018-1>.
- Bamière, Laure, et Valentin Bellassen. 2018. « Review of the Impacts on Greenhouse Gas Emissions of Land-Use Changes Induced by Non-food Biomass Production ». In *Sustainable Agriculture Reviews* 30, édité par Olivier Réchauchère, Antonio Bispo, Benoît Gabrielle, et David Makowski, vol. 30. Sustainable Agriculture Reviews. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96289-4_6.
- Barron-Gafford, Greg A., Mitchell A. Pavao-Zuckerman, Rebecca L. Minor, et al. 2019. « Agrivoltaics Provide Mutual Benefits across the Food–Energy–Water Nexus in Drylands ». *Nature Sustainability* 2 (9): 848-55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>.
- Baumbauer, David A., Colleen B. Schmidt, et Macdonald H. Burgess. 2019. « Leaf Lettuce Yield Is More Sensitive to Low Daily Light Integral than Kale and Spinach ». *HortScience* 54 (12): 2159-62. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14288-19>.
- Boroujerdnia, Maryam, et Naser Alemzadeh Ansari. 2007. *Effect of Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Cultivars on Growth, Yield and Yield Components of Romaine Lettuce (Lactuca Sativa L.* Global Science Books, décembre.

- https://www.academia.edu/24836415/Effect_of_Different_Levels_of_Nitrogen_Fertilizer_and_Cultivars_on_Growth_Yield_and_Yield_Components_of_Romaine_Lettuce_Lactuca_sativa_L.
- Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, et al. 2023. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. First. Avec Hoesung Lee. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Chen, Zijong, Yingyan Han, Kang Ning, et al. 2019. « Assessing the Performance of Different Irrigation Systems on Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) in the Greenhouse ». *PLOS ONE* 14 (2): e0209329. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209329>.
- Chock, Rachel Y., Barbara Clucas, Elizabeth K. Peterson, et al. 2021. « Evaluating Potential Effects of Solar Power Facilities on Wildlife from an Animal Behavior Perspective ». *Conservation Science and Practice* 3 (2): e319. <https://doi.org/10.1111/csp2.319>.
- Deline, Chris, Sara MacAlpine, Bill Marion, Fatima Toor, Amir Asgharzadeh, et Joshua S. Stein. 2017. « Assessment of Bifacial Photovoltaic Module Power Rating Methodologies—Inside and Out ». *IEEE Journal of Photovoltaics* 7 (2): 575-80. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2650565>.
- Department of Economic and Social Affairs. s. d. « World Population Prospects ». World Population Prospects 2024. Consulté le 12 août 2025. <https://population.un.org/wpp/>.
- Dinesh, Harshavardhan, et Joshua M. Pearce. 2016. « The Potential of Agrivoltaic Systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54 (février): 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>.
- Dresch, Cédric. 2024. « L'économie d'énergie en agriculture indoor : étude des effets de modifications de la photopériode sur les paramètres agronomiques et la physiologie pré et post récolte des laitues ». Phdthesis, Université d'Avignon. <https://theses.hal.science/tel-04634062>.
- Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, et Y. Ferard. 2011. « Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes ». *Renewable Energy, Renewable Energy: Generation & Application*, vol. 36 (10): 2725-32. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- Einstein, Albert. 1905. « Über einem die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt ». *Annalen der Physik* 4, t. 17. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/2784>.
- Elamri, Y., B. Cheviron, J. -M. Lopez, C. Dejean, et G. Belaud. 2018. « Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces ». *Agricultural Water Management* 208 (septembre): 440-53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>.
- Elamri, Yassin, Bruno Cheviron, Annabelle Mange, Cyril Dejean, François Liron, et Gilles Belaud. 2017. « Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots ». Prépublication, Water Resources Management/Modelling approaches, juillet 27. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-418>.
- Énergie solaire. 2024. « Énergie solaire ». juin 25. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>.

- Enza Zaden. s. d. « Amaroza ». Consulté le 20 février 2025.
<https://www.enzazaden.com/fr/products-and-services/our-products/laitue/Amaroza>.
- Evans, J. R., et H. Poorter. 2001. « Photosynthetic Acclimation of Plants to Growth Irradiance: The Relative Importance of Specific Leaf Area and Nitrogen Partitioning in Maximizing Carbon Gain ». *Plant, Cell & Environment* 24 (8): 755-67.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00724.x>.
- Fabrégat, Sophie. 2021. « Le solaire bifacial, à l'aube de son essor ? » Actu-Environnement, Actu-environnement, avril 13.
<https://www.actu-environnement.com/ae/news/technologie-panneaux-solaires-photovoltaiques-bifacial-37358.php4>.
- Faturrochman, G. J., M. M. de Jong, R. Santbergen, W. Folkerts, M. Zeman, et A. H. M. Smets. 2018. « Maximizing annual yield of bifacial photovoltaic noise barriers ». *Solar Energy* 162 (mars): 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.001>.
- Ferreira, Lucianna Marques Rocha, Luciana S. Esteves, Enio Pereira De Souza, et Carlos Antonio Costa Dos Santos. 2019. « Impact of the Urbanisation Process in the Availability of Ecosystem Services in a Tropical Ecotone Area ». *Ecosystems* 22 (2): 266-82.
<https://doi.org/10.1007/s10021-018-0270-0>.
- Ferreira, Rafael Faustino, Ricardo A. Marques Lameirinhas, Catarina P. Correia V. Bernardo, João Paulo N. Torres, et Marcelino Santos. 2024. « Agri-PV in Portugal: How to combine agriculture and photovoltaic production ». *Energy for Sustainable Development* 79 (avril): 101408. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101408>.
- Frumkin, Howard, Jeremy Hess, et Stephen Vindigni. 2009. « Energy and Public Health: The Challenge of Peak Petroleum ». *Public Health Reports®* 124 (1): 5-19.
<https://doi.org/10.1177/003335490912400103>.
- Gargaro, Michael, Richard J. Murphy, et Zoe M. Harris. 2023. « Let-Us Investigate; A Meta-Analysis of Influencing Factors on Lettuce Crop Yields within Controlled-Environment Agriculture Systems ». *Plants* 12 (14): 14. <https://doi.org/10.3390/plants12142623>.
- Garrod, Aydan, et Aritra Ghosh. 2023. « A Review of Bifacial Solar Photovoltaic Applications ». *Frontiers in Energy* 17 (6): 704-26. <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0903-7>.
- Gaudreau, Linda, Josée Charbonneau, Louis-Philippe Vézina, et André Gosselin. 1994. « Photoperiod and Photosynthetic Photon Flux Influence Growth and Quality of Greenhouse-grown Lettuce ». *HortScience* 29 (11): 1285-89. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.29.11.1285>.
- Gavhane, Kishor P., Murtaza Hasan, Dharendra Kumar Singh, Soora Naresh Kumar, Rabi Narayan Sahoo, et Wasi Alam. 2023. « Determination of Optimal Daily Light Integral (DLI) for Indoor Cultivation of Iceberg Lettuce in an Indigenous Vertical Hydroponic System ». *Scientific Reports* 13 (1): 10923. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36997-2>.
- Gorjian, Shiva, Erion Bousi, Özal Emre Özdemir, et al. 2022. « Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158 (avril): 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>.
- Gostein, Michael, Bodo Littmann, J. Riley Caron, et Lawrence Dunn. 2013. « Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements ». *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, juin, 3004-9.

- <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6745094>.
- Greenpeace France. 2025. « Quel est l'impact environnemental des panneaux solaires ». mars 5. <https://www.greenpeace.fr/impact-environnemental-solaire/>.
- Gu, Wenbo, Tao Ma, Salman Ahmed, Yijie Zhang, et Jinqing Peng. 2020. « A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology ». *Energy Conversion and Management* 223 (novembre): 113283. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113283>.
- IEA. s. d. « International Energy Agency : Renewables - Energy System ». Consulté le 6 août 2025. <https://www.iea.org/energy-system/renewables>.
- Imfeld, Gwenaél, et Stéphane Vuilleumier. 2012. « Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review ». *European Journal of Soil Biology*, Bioindication in Soil Ecosystems, vol. 49 (mars): 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.010>.
- Jang, Juhee, et Kyungsoo Lee. 2020. « Practical Performance Analysis of a Bifacial PV Module and System ». *Energies* 13 (17): 4389. <https://doi.org/10.3390/en13174389>.
- Jin, Wenqing, David Formiga Lopez, Ep Heuvelink, et Leo F. M. Marcelis. 2023. « Light Use Efficiency of Lettuce Cultivation in Vertical Farms Compared with Greenhouse and Field ». *Food and Energy Security* 12 (1): e391. <https://doi.org/10.1002/fes3.391>.
- Kang, Jeong Hwa, Sugumaran KrishnaKumar, Sarah Louise Sua Atulba, Byoung Ryong Jeong, et Seung Jae Hwang. 2013. « Light Intensity and Photoperiod Influence the Growth and Development of Hydroponically Grown Leaf Lettuce in a Closed-Type Plant Factory System ». *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 54 (6): 501-9. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0109-8>.
- Katsikogiannis, Odysseas Alexandros, Hesam Ziar, et Olindo Isabella. 2022. « Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach ». *Applied Energy* 309 (mars): 118475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118475>.
- Kelly, Nathan, Daegeun Choe, Qingwu Meng, et Erik S. Runkle. 2020. « Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod ». *Scientia Horticulturae* 272 (octobre): 109565. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109565>.
- Khan, M. Ryyan, Amir Hanna, Xingshu Sun, et Muhammad A. Alam. 2017. « Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization ». *Applied Energy* 206 (novembre): 240-48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.042>.
- Khodadad, Christina L. M., Mary E. Hummerick, LaShelle E. Spencer, et al. 2020. « Microbiological and Nutritional Analysis of Lettuce Crops Grown on the International Space Station ». *Frontiers in Plant Science* 11 (mars): 199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00199>.
- Kopecek, Radovan, et Joris Libal. 2021. « Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges ». *Energies* 14 (8): 8. <https://doi.org/10.3390/en14082076>.
- La librairie ADEME. s. d. « Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme ». Consulté le 15 août 2025. <https://librairie.ademe.fr/energies/4992-caracteriser-les-projets-photovoltaïques-sur-terrains-agricoles-et-l-agrivoltaïsme.html>.
- Lake, Lachlan, Lydie Guilioni, Bob French, et Victor O. Sadras. 2021. « Chapter 9 - Field pea ». In

Crop Physiology Case Histories for Major Crops, édité par Victor O. Sadras et Daniel F. Calderini. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00009-8>.

L'archenterre. s. d. « L'archenterre ». Consulté le 25 mars 2025. <https://www.larchenterre.be/lesite/>.

Laub, Moritz, Lisa Pataczek, Arndt Feuerbacher, Sabine Zikeli, et Petra Högy. 2022. « Contrasting Yield Responses at Varying Levels of Shade Suggest Different Suitability of Crops for Dual Land-Use Systems: A Meta-Analysis ». *Agronomy for Sustainable Development* 42 (3): 51. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00783-7>.

Lelieveld, J., K. Klingmüller, A. Pozzer, R. T. Burnett, A. Haines, et V. Ramanathan. 2019. « Effects of Fossil Fuel and Total Anthropogenic Emission Removal on Public Health and Climate ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (15): 7192-97. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>.

Mahim, Tanvir M., A. H. M. A. Rahim, et M. Mosaddequr Rahman. 2024. « Review of Mono- and Bifacial Photovoltaic Technologies: A Comparative Study ». *IEEE Journal of Photovoltaics* 14 (3): 375-96. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2024.3366698>.

Maisonneuve, B. 2013. « Salades - Les différents types de laitues cultivées ». INRAE. Ephytia, février 14. <https://ephytia.inra.fr/fr/C/6042/Salades-Les-differents-types-de-laitues-cultivees?>

Marion, Bill, Sara MacAlpine, Chris Deline, et al. 2017. « A Practical Irradiance Model for Bifacial PV Modules ». *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, juin, 1537-42. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366263>.

Marrou, H., L. Dufour, et J. Wery. 2013. « How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? » *European Journal of Agronomy* 50 (octobre): 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>.

Marrou, H., L. Guillioni, L. Dufour, C. Dupraz, et J. Wery. 2013. « Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? » *Agricultural and Forest Meteorology* 177 (août): 117-32. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.

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

Martin, Bernard K. 2016. *La fertilité des sols part en poussière, Énergie - Environnement*. janvier 14.

McCree, K. J. 1972. « Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data ». *Agricultural Meteorology* 10 (janvier): 443-53. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(72\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(72)90045-3).

McHale, Leah K., Maria José Truco, Alexander Kozik, et al. 2009. « The Genomic Architecture of Disease Resistance in Lettuce ». *Theoretical and Applied Genetics* 118 (3): 565-80. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0921-1>.

Mohammed, Ali Seid, Anil Kapri, et Reeta Goel. 2011. « Heavy Metal Pollution: Source, Impact, and Remedies ». In *Biomanagement of Metal-Contaminated Soils*, édité par Mohammad Saghir Khan, Almas Zaidi, Reeta Goel, et Javed Musarrat. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1914-9_1.

Mouhib, Elmehdi, Leonardo Micheli, Florencia M. Almonacid, et Eduardo F. Fernández. 2022. « Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology:

- Agrivoltaics and Aquavoltaics ». *Energies* 15 (23): 23. <https://doi.org/10.3390/en15238777>.
- Normes de qualité pour les laitues, chicorées frisées et scaroles et pour les poivrons ou piments doux, 79/88 79/88 (1988).
- Oyejola, B. A., et R. Mead. 1982. « Statistical Assessment of Different Ways of Calculating Land Equivalent Ratios (LER) ». *Experimental Agriculture* 18 (2): 125-38. <https://doi.org/10.1017/S0014479700013600>.
- Palsha, Peyton Lou, Marc W. Van Iersel, Ryan William Dickson, et al. 2024. « Strategic Light Use Efficiency Optimization of Hydroponic Lettuce Exposed to Different Photosynthetic Photon Flux Densities ». *Agronomy* 14 (10): 2281. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102281>.
- Pascaris, Alexis S., Chelsea Schelly, et Joshua M. Pearce. 2020. « A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics ». *Agronomy* 10 (12): 1885. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121885>.
- Pelaez, Silvana Ayala, Chris Deline, Sara M. MacAlpine, Bill Marion, Joshua S. Stein, et Raymond K. Kostuk. 2019. « Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation ». *IEEE Journal of Photovoltaics* 9 (1): 82-88. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2877000>.
- Petcu, Elena, Gheorghe Petcu, Cătălin Lazăr, et Roxana Vintilă. 2001. « RELATIONSHIP BETWEEN LEAF AREA INDEX, BIOM ASS AND WINTER WHEAT YIELD OBTAINED AT FUNDULEA, UNDER CONDITIONS OF 2001 YEAR ». *ROMANIAN AGRICULTURAL RESEARCH*.
- Priac, Anne. 2014. « Lactuca sativa L. : Evaluation écotoxicologique de rejets industriels complexes et de solutions synthétiques ». Phdthesis, Université de Franche-Comté. <https://doi.org/10/document>.
- Ramos-Fuentes, Arturo Isaac. 2025. *Analysis of the Effects of Shade Combined with Water Stress on the Growth and Water Consumption of Maize Cropping under AgriVoltaic Systems: Experimental Approach and Parsimonious Modeling*. janvier 13.
- Ravi, Sujith, Jordan Macknick, David Lobell, et al. 2016. « Colocation Opportunities for Large Solar Infrastructures and Agriculture in Drylands ». *Applied Energy* 165 (mars): 383-92. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>.
- Ricaud, Alain. 2007. *Convertisseurs photovoltaïques*. novembre.
- Riedel-Lyngskær, Nicholas, Martynas Ribaconka, Mário Pó, et al. 2022. « The Effect of Spectral Albedo in Bifacial Photovoltaic Performance ». *Solar Energy* 231 (janvier): 921-35. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.023>.
- Sago, Yuki. 2016. « Effects of Light Intensity and Growth Rate on Tipburn Development and Leaf Calcium Concentration in Butterhead Lettuce ». *HortScience* 51 (9): 1087-91. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10668-16>.
- Schröter, Iris, Niels Püttchneider, et Marcus Mergenthaler. 2023. « Visual Perception and Acceptance Of Agrivoltaic In An Eye-Tracking Experiment In Germany ». <https://www.semanticscholar.org/paper/Visual-Perception-and-Acceptance-Of-Agrivoltaic-In-Schr%C3%B6ter%C2%B9-P%C3%BCttchneider%C2%B9/db7736084b315978f40d34eac34339b41eef7525>.

- Setynk. 2023. « What Is the Optimal Light Spectrum for Plant Growth ». *Boyalite | Manufacturer of High Quality LED Grow Lights*, octobre 28.
<https://boyagrowlight.com/the-optimal-light-spectrum-for-plant-growth/>.
- Shah, Adnan Noor, Mohsin Tanveer, Babar Shahzad, et al. 2017. « Soil Compaction Effects on Soil Health and Crop productivity: An Overview ». *Environmental Science and Pollution Research* 24 (11): 10056-67. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>.
- Sharma, S., T. Sheehy, et L. Kolonel. 2014. « Sources of Vegetables, Fruits and Vitamins A, C and E among Five Ethnic Groups: Results from a Multiethnic Cohort Study ». *European Journal of Clinical Nutrition* 68 (3): 384-91. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2013.271>.
- Sheikhi, Hossein, Mojtaba Delshad, Sasan Aliniaiefard, et al. 2024. « Trait Component Analysis of Lettuce in Response to Daily Light Integrals at Two Growth Stages ». *Agrosystems, Geosciences & Environment* 7 (4): e20579. <https://doi.org/10.1002/agg2.20579>.
- Shen Liang, Tian, Mauro Pravettoni, Chris Deline, et al. 2019. « A Review of Crystalline Silicon Bifacial Photovoltaic Performance Characterisation and Simulation ». *Energy & Environmental Science* 12 (1): 116-48. <https://doi.org/10.1039/C8EE02184H>.
- Silva, Luciano M., Larissa P. Cruz, Vinícius S. Pacheco, Eduardo C. Machado, Luis Felipe V. Purquerio, et Rafael V. Ribeiro. 2022. « Energetic Efficiency of Biomass Production Is Affected by Photoperiod in Indoor Lettuce Cultivation ». *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 34 (2): 265-76. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00246-0>.
- Sovacool, Benjamin K., et Pushkala Lakshmi Ratan. 2012. « Conceptualizing the acceptance of wind and solar electricity ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7): 5268-79.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.048>.
- Stein, Joshua, Christian Reise, Johanna Castro, et al. 2021. *Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications*. SAND--2021-4835R, IEA--PVPS T13-14:2021, 1779379. <https://doi.org/10.2172/1779379>.
- Still, David W. 2007. « Lettuce ». In *Vegetables*, édité par Chittaranjan Kole. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-34536-7_2.
- Taylor, Rachel, Joanne Conway, Owain Gabb, et J Gillespie. 2019. *Potential ecological impacts of groundmounted photovoltaic solar panels An introduction and literature review*.
- Tegas, Loredana. 2022. « Hausse des prix de l'énergie : les panneaux solaires ont la cote ». *Panneausolaire-info.be*, avril 7.
<https://www.panneausolaire-info.be/actualites/hausse-prix-energie>.
- Tei, F., A. Scaife, et D. P. Aikman. 1996. « Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency ». *Annals of Botany* 78 (5): 633-43.
- Tisserand, Gaëlle. 2023. « Fiche technique : itineraire de la laitue ». Développement de l'agriculture biologique.
<https://www.armeflor.fr/wp-content/uploads/2024/06/2023-FICHE-TECHNIQUE-Itineraire-Laitue-en-AB-BD.pdf>.
- Valente, Christopher. 2022. « Etude de marché. Production végétale d'intérêt pour l'aquaponie en Wallonie : salades, herbes aromatiques et légumes racines ».
<https://collegedesproducteurs.be/wp-content/uploads/2024/02/Aqualoci-Etude-de-marche-pro>

ductions-vegetales.pdf.

- Verolet, J-François, Roger Raffin, Ludovic Jagu, et Dominique Berry. 2000. *Fiche technique en agriculture biologique : Laitue et Batavia*.
- Wallace, Russell W., Annette L. Wszelaki, Carol A. Miles, et al. 2012. *Lettuce Yield and Quality When Grown in High Tunnel and Open-Field Production Systems Under Three Diverse Climates*. HortTechnology. octobre 1. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.22.5.659>.
- Wei, Qingzhu, Chenyang Wu, Xiaorui Liu, et al. 2016. « The Glass-glass Module Using n-type Bifacial Solar Cell with PERT Structure and its Performance ». *Energy Procedia*, Proceedings of the 6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2016), vol. 92 (août): 750-54. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.054>.
- Weselek, Axel, Andrea Ehmann, Sabine Zikeli, Iris Lewandowski, Stephan Schindele, et Petra Högy. 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>.
- World Bank Open Data. s. d. « World Bank Open Data ». Consulté le 28 mars 2025. <https://data.worldbank.org>.
- Wüstenhagen, Rolf, Maarten Wolsink, et Mary Jean Burer. 2007. « Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept ». *Energy Policy* 35 (5): 2683-91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>.
- Yan, Guangjian, Ronghai Hu, Jinghui Luo, et al. 2019. « Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives ». *Agricultural and Forest Meteorology* 265 (février): 390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>.
- Yan, Zhengnan, Dongxian He, Genhua Niu, Qing Zhou, et Yinghua Qu. 2019. « Growth, Nutritional Quality, and Energy Use Efficiency of Hydroponic Lettuce as Influenced by Daily Light Integrals Exposed to White versus White Plus Red Light-emitting Diodes ». *HortScience* 54 (10): 1737-44. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14236-19>.
- Yang, Shengping, et Gilbert Berdine. 2021. « Normality tests ». *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles* 9 (37): 87-90. <https://doi.org/10.12746/swrccc.v9i37.805>.
- Yu, Bo, Dengyuan Song, Zhonggang Sun, et al. 2016. « A study on electrical performance of N-type bifacial PV modules ». *Solar Energy* 137 (novembre): 129-33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.011>.
- Yusufoglu, U.A., T.M. Pletzer, L.J. Koduvelikulathu, C. Comparotto, R. Kopecek, et H. Kurz. 2015. « Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods ». *IEEE Journal of Photovoltaics* 5 (1): 320-28. Scopus. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2364406>.
- Zainol Abidin, Mohd Ashraf, Muhammad Nasiruddin Mahyuddin, et Muhammad Ammirul Atiqi Mohd Zainuri. 2021. « Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review ». *Sustainability* 13 (14): 14. <https://doi.org/10.3390/su13147846>.
- Zhang, Pei, et Yinguang Chen. 2017. « Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: A review ». *Science of The Total Environment* 605-606 (décembre): 1011-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.247>.

9. Annexes

Annexe 1 : Fiche technique des polycarbonates semi-transparents et transparents utilisés pour la construction de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).

	TECHNICAL DATASHEET SCHEDA TECNICA Corrugated polycarbonate sheet <i>Lastra corrugata in policarbonato</i>	Product code: E381-E308 E304-E305 Version: 00 Latest update: 26.04.2019 Page: 1/2
	Macrolux® Rooflite® Wave 177/51 0.9 mm; 1.0 mm; 1.2 mm; 1.4 mm	

SECTION RAA



TECHNICAL CHARACTERISTICS

Code	Units	Value				Notes
		E381	E308	E304	E305	
Thickness	mm	0.9	1.0	1.2	1.4	
Weight	Kg/m ²	1.31	1.45	1.70	2.00	-
Pitch	mm	177				-
Nominal width	mm	920 1097 1186				Tolerance ±10 mm
Cover	mm	708 885 1062				Tolerance ± 5 mm
Length ⁽¹⁾⁽²⁾	mm	On request				Maximum suggested length 6,0 m
Light transmission ⁽³⁾⁽⁴⁾	%	89				Clear (0010)
		75				Opal (0037)
Fire certification	-	B s1 d0				According to EN 13501-1 (**)
Minimum bending radius	mm	11500				-
Coefficient of thermal expansion	mm/m °C	0,065				-
Service temp. (continuous use)	°C	-40° +120°				
UV protection	-	Yes				Coextruded on external side
Warranty						Refer to Stabil 10 years limited warranty

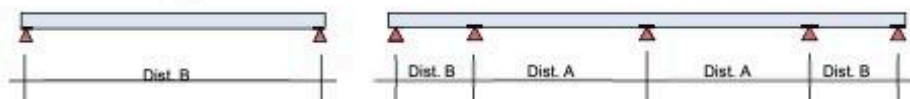
(1) Parallel and diagonal max ±10 mm
 (2) Banana effect and side warp max ±3 mm/m
 (3) Internal test in according to ASTM standard
 (4) For thickness of 1.0 mm
 (**) Fire certification could be subject to limitations.
 Dimensional tolerance in according to EN 1013.

STABILIT SUISSE SA
 Via Lische 11/13 - P.O. Box 702 - 6855 Stabio - Switzerland - P.Iva CHE-101.684.884
 T. +41 (0)91 641 72 72 F. +41 (0)91 641 72 80 info@stabilitsuisse.com
 www.stabilitsuisse.com

	TECHNICAL DATASHEET SCHEDA TECNICA Corrugated polycarbonate sheet <i>Lastra corrugata in policarbonato</i>	Product code: E381-E308 E304-E305 Version: 00 Latest update: 26.04.2019 Page: 2/2
	Macrolux® Rooflite® Wave 177/51 0.9 mm; 1.0 mm; 1.2 mm; 1.4 mm	

ULTIMATED LOAD VALUES FOR DISTRIBUTED LOADS

✓ LOAD VALUES (*) FOR EVENLY DISTRIBUTED LOAD



Thickness mm	Distance A				Distance B			
	600 N/m ²	900 N/m ²	1.200 N/m ²	1.500 N/m ²	600 N/m ²	900 N/m ²	1.200 N/m ²	1.500 N/m ²
0.9	1.600	1.450	1.350	1.250	1.250	1.150	1.050	1.000
1.0	1.650	1.500	1.350	1.300	1.300	1.200	1.100	1.050
1.2	1.700	1.550	1.450	1.350	1.350	1.250	1.150	1.100
1.4	1.750	1.600	1.500	1.400	1.400	1.300	1.200	1.150

(*) Ultimate load values (safety coefficient 1.5)

Installation

We recommend to install sheets at a minimum roof slope of 5%.
 MACROLUX® ROOFLITE® must be fastened to the support frame by a suitable number of fasteners chosen according to the type of support (wood, metal purlins, etc.). Fasteners should not exercise pressure on the sheet to avoid excessive deformation. Fastening points to all supports must include suitable washers to prevent water leakage. Slole holes are required to allow thermal expansion of sheets.
 Supports must be smooth and clear of any objects that may affect sheet integrity such as nails, wires, ties, safety nets, etc.

Roof access

Do not walk on sheets during installation and maintenance operations. Sheets are NOT suitable for bearing weight and may break. If it is necessary to access the roof, we recommend to use suitable footways to ensure that all operators can work safely.
 Protect sheets from scratches with suitable cloths. To avoid the risk of falls and sheet breaking during roof maintenance, provide all necessary structures according to industrial safety regulations in force.

Cutting, storage and cleaning

Cut MACROLUX® ROOFLITE® with standard shears. Make sure that sheets are firmly clamped during cutting operations to avoid vibrations. Pallets of sheets can be stacked up to a maximum of 4 m rows only during transportation, while laying an insulating material between one pallet and the other which must protect and avoid the crushing of the lower pallets and sheets. Furthermore the pallets of sheets must be stored away from sunlight or other heat sources.
 Do not place any load on the sheets during transportation or storage. To preserve perfect transparency, clean the external surface of sheets regularly with water and mild detergents. Do not scratch the surface with abrasives, blades or pointed tools to avoid damaging the protection layer.

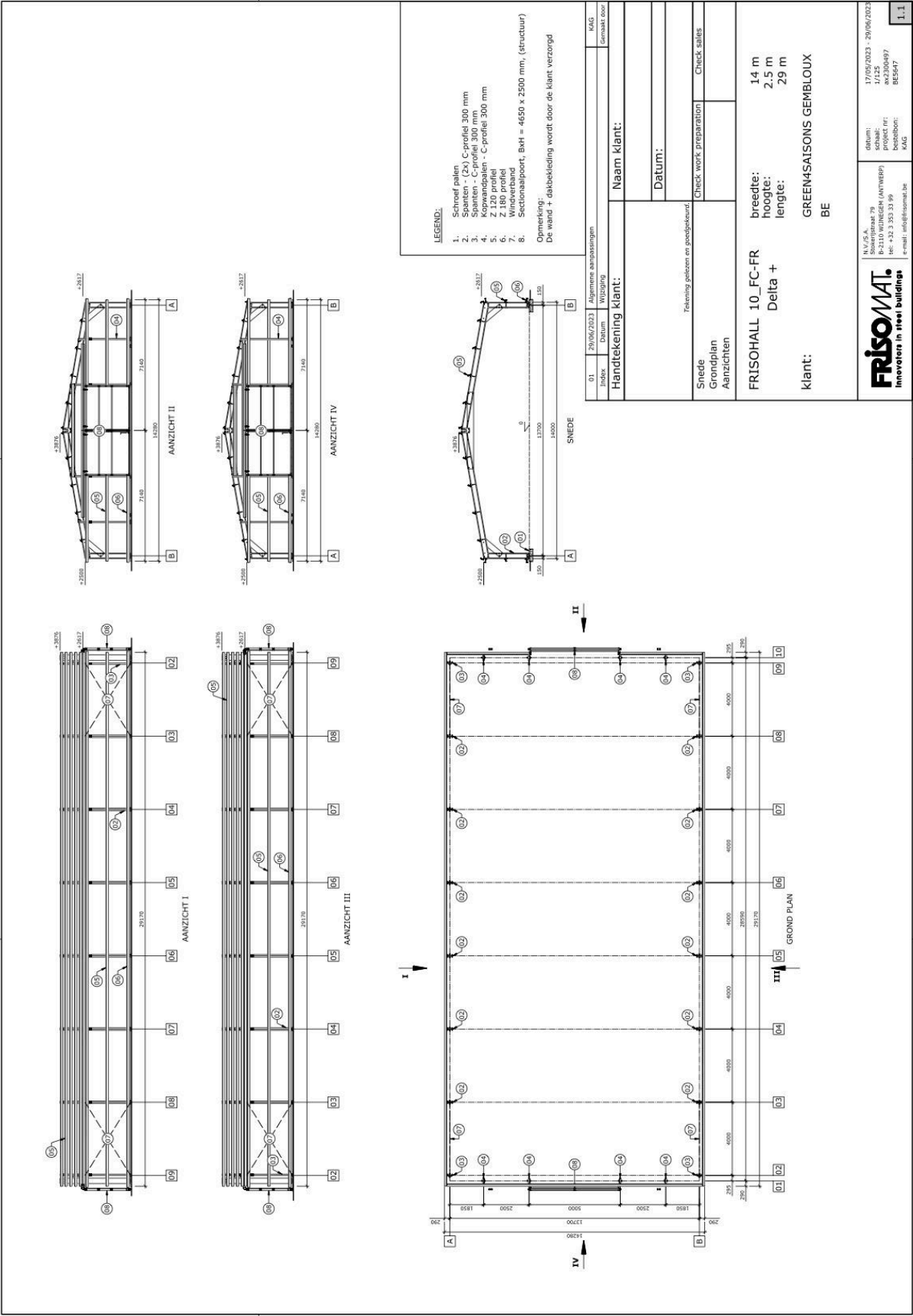
RESPONSIBILITY ON PRODUCTS: all information contained in our technical sheets, technical manuals and commercial brochures as well as all technical data given verbally and/or written, are based on our best knowledge but they are non-binding information and do not release Client from executing own checking tests of our information data (with particular regards to our technical data) and of suitability of our products to the final use. The use and assembly of our products and of all the projects accomplished with our products and based on our data, cannot be checked by STABILIT SUISSSE Technical Department and therefore are sole responsibility of the Client. All the information in this documentation may be subject to change by STABILIT SUISSSE SA without obligation to provide advance notice of any changes made.

RESPONSABILITÀ: le informazioni contenute nelle schede tecniche, nei manuali tecnici e nelle brochure commerciali, così come i dati tecnici forniti per iscritto o a parole, si basano sulle nostre migliori conoscenze ma non hanno carattere vincolante e non esentano il Cliente dall'eseguire propri controlli sulle nostre informazioni tecniche (in particolare per quanto riguarda i dati tecnici) e sull'idoneità dei nostri prodotti in riferimento all'uso previsto. L'utilizzo e la lavorazione dei nostri prodotti, oltre che dei progetti realizzati dal Cliente in base ai nostri dati, non possono essere da noi controllati e pertanto ne risponde solo ed esclusivamente il Cliente stesso. Tutti i dati

STABILIT SUISSSE SA

Via Lische 11/13 - P.O. Box 702 - 6855 Stabio - Switzerland - P.Iva CHE-101.684.884
 T. +41 (0)91 641 72 72 F. +41 (0)91 641 72 80 info@stabilitsuisse.com
 www.stabilitsuisse.com

Annexe 2 : Plan technique de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).



Gigola®

VENTILADORES EXTRACTORES VENTILATEURS EXTRACTEURS



SERIE EOLOSTAR SÉRIE EOLOSTAR

ES 200 R/S - 69"
ES 150 R/S - 55"
ES 140 R/S - 51"
ES 120 R/S - 39"
ES 100 R/S - 31"
ES 80 R/S - 26"

GIGOLA E RICCARDI S.p.A.

GRANJAS DE GANADO / ÉLEVAGES

INVERNADEROS / SERRES

INDUSTRIAS / INDUSTRIES

MADE IN ITALY



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

NUEVO

SISTEMA PARA DESMONTAJE FÁCIL DEL MOTOR

Nuestro nuevo brazo porta motor permite desmontar el motor rápidamente sin tener que desmontar la polea.

ÁLABES DE ACERO INOXIDABLE

Nuestros álabes, muy resistentes, poseen una duración mucho mayor que la de los álabes cincados.

PALES EN ACIER INOX

Nos pales sont très résistantes et ont une durée très supérieures par rapport aux pales zinguées.

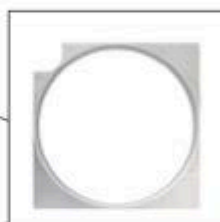


BOCA VENTURI DE MOPLEN

La boca Venturi de Moplen es muy resistente y fácil de instalar y de mantener. Resulta fácil de limpiar y no está sujeta a corrosión.

EMBOUT VENTURI EN MOPLEN

L'embout Venturi en Moplen est très résistant et facile à installer et entretenir. Il est facile à nettoyer et n'est pas sujet à la corrosion.



SISTEMA DE APERTURA CENTRÍFUGA PATENTADO

Nuestro sistema de apertura centrífuga patentado es la solución ideal para abrir y cerrar la persiana sin utilizar otros dispositivos eléctricos.

SYSTÈME D'OUVERTURE CENTRIFUGE BREVETÉ

Notre système d'ouverture centrifuge breveté est la solution idéale pour ouvrir et fermer le volet sans utiliser d'autres dispositifs électriques.



SOPORTE CON ESTRUCTURA DE X

La estructura del ventilador se distingue por su forma en X, que otorga al aparato una mayor solidez y contribuye a reducir las vibraciones. La estructura en X está realizada con tubo de sección rectangular.

SUPPORT AVEC STRUCTURE EN X

La structure du ventilateur possède une forme en X particulière pour lui conférer une plus grande robustesse et pour réduire les vibrations. La structure X est réalisée avec un tube à section triangulaire.



El ventilador es resistente a la humedad, al calor y al frío (como se especifica mejor en el manual de uso y mantenimiento) y se ha diseñado específicamente para funcionar en ambientes altamente corrosivos o con sustancias abrasivas. Por lo tanto, el ventilador deberá utilizarse solo para los fines para los que se ha diseñado y de conformidad con la normativa vigente. El cliente tiene la responsabilidad de solicitar un motor adecuado de conformidad con las normativas locales vigentes. El ventilador estándar con persiana esta proporcionado con una sola red de protección. Las normativas locales pueden solicitar una red adicional. Esto esta conectado a la altura donde el ventilador esta instalado. El cliente esta responsable de la verificación y el respeto de las normativas locales y tiene que preguntar para una red apropiada si se necesita. El usuario asume la plena responsabilidad en caso de uso no conforme. Se ruega consultar el manual de uso y mantenimiento para toda aclaración.

NOUVEAU

SYSTÈME POUR UN DÉMONTAGE FACILE DU MOTEUR

Notre nouveau bras porte-moteur permet le démontage rapide du moteur, sans devoir retirer la poulie.



VERSIÓN INOX AISI 304 DISPONIBLE BAJO PEDIDO

Ideal para entornos difíciles como las granjas porcinas, nuestro ventilador de acero inoxidable AISI 304 posee una resistencia aún mayor a la corrosión. Existe para las dimensiones siguientes: 100 y 140.

VERSION INOX AISI 304 DISPONIBLE SUR DEMANDE

Idéal pour les lieux très agressifs comme les élevages porcins, notre ventilateur réalisé en acier inox AISI 304 est encore plus résistant à la corrosion. Il est disponible pour les dimensions suivantes: 100 et 140.

COLOR DE LA BOCA DEL VENTURI PERSONALIZABLE

La boca Venturi de Moplen se puede personalizar con el color institucional del cliente para así obtener un producto único (para pedidos de al menos 500 unidades).

COULEUR DE L'EMBOU VENTURI PERSONNALISABLE

L'embout Venturi en Moplen peut être personnalisé avec la couleur institutionnelle du client pour obtenir un produit unique (pour commandes de 500 pièces minimum).



DOBLE COJINETE

Nuestros ventiladores van equipados con dos cojinetes en lugar de uno para un equilibrio óptimo. Un distanciador separa los dos cojinetes.

DOUBLE ROULEMENT

Pour un équilibrage optimal, nos ventilateurs sont équipés de deux roulements au lieu d'un seul. Les deux roulements sont séparés par une entretoise.



COSTADOS DE METAL

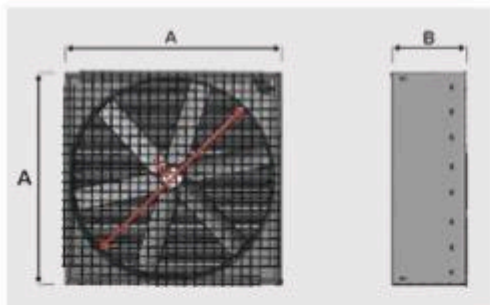
Los costados almohadillada limitan el paso de la luz y del polvo dentro del edificio cuando el ventilador no está funcionando.

FLANCS EN MÉTAL

Les flancs larmés limitent le passage de la lumière et de la poussière dans l'établissement lorsque le ventilateur n'est pas en fonction.

Le ventilateur est résistant à l'humidité, à la chaleur et au froid (comme spécifié plus en détails dans le manuel d'utilisation et d'entretien) et il a été spécifiquement conçu pour fonctionner dans des milieux fortement corrosifs ou avec des substances abrasives. Par conséquent, le ventilateur devra être utilisé uniquement pour les buts dans lesquels il a été conçu et conformément aux normes en vigueur. Le client a la responsabilité de demander un moteur adapté, conformément aux normes locales en vigueur. Les ventilateurs standard avec le volet sont équipés avec une seule grille de protection. Les règlements de chaque pays peuvent demander supplémentaires grilles pour le volet. Cela peut être connecté à la hauteur à laquelle le ventilateur est installé. Le client est responsable de vérifier la conformité aux règlements et doit demander, si nécessaire, une grille de protection appropriée. L'utilisateur assume l'entière responsabilité de toute utilisation non conforme. Pour tout éclaircissement, consulter le manuel d'utilisation et d'entretien.

DATOS TÉCNICOS DONNÉES TECHNIQUES



DIMENSIONES / DIMENSIONS

TIPO TYPE	A mm	B mm	C in	PESO POIDS kg
ES200 - 69"	1930	450	69	121
ES150 - 55"	1495	430	55	77
ES140 - 51"	1380	405	51	68
ES120 - 39"	1150	405	39	56
ES100 - 31"	969	405	31	44
ES80 - 26"	800	405	26	37

NIVEL SONORO / ÉMISSION DE BRUIT

VENTILADORES VENTILADORES EOLISTAR	hp	LpA* dB(A)
ES200 - 69"	2,5	71,8
	2	70,2
ES150 - 55"	2	73,7
	1,5	72,1
ES140 - 51"	1,5	73,4
	1	70,4
ES120 - 39"	1	74,2
	0,75	72,4
ES100 - 31"	0,75	69,2
	0,5	67,3
ES80 - 26"	0,5	64,5
	0,35	62,3

DATOS ELÉCTRICOS / DONNÉES ÉLECTRIQUES

TIPO TYPE	POTENCIA PUISANCE hp	POTENCIA PUISANCE kW	VOLTAJE TENSION V	FRECUENCIA FREQUENCE Hz
ES200 - 69"	2,5	1,83	230/400	50/60
	2	1,5	230/400	50/60
ES150 - 55"	2	1,5	230/400	50/60
	1,5	1,1	230/400	50/60
ES140 - 51"	1,5	1,1	230/400	50/60
	1	0,75	230/400	50/60
ES120 - 39"	1	0,75	230/400	50/60
	0,75	0,55	230/400	50/60
ES100 - 31"	0,75	0,55	230/400	50/60
	0,5	0,37	230/400	50/60
ES80 - 26"	0,5	0,37	230/400	50/60
	0,35	0,26	230/400	50/60

PRESTACIONES / PERFORMANCES

VENTILADORES VENTILADORES EOLISTAR	hp	0 Pa	5 Pa	10 Pa	20 Pa	35 Pa
		cfm / ft³/s	cfm / ft³/s	cfm / ft³/s	cfm / ft³/s	cfm / ft³/s
ES200 - 69"	2,5	77.340	29,74	74.422	30,9	72.377
	2	72.411	29	69.546	30,2	66.159
ES150 - 55"	2	51.230	40,99	50.344	41,71	48.547
	1,5	47.690	35,71	46.100	36,88	44.500
ES140 - 51"	1,5	41.306	41,16	38.701	43,99	36.893
	1	37.965	31,61	35.832	33,49	33.698
ES120 - 39"	1	27.144	44,21	25.919	46,3	24.512
	0,75	24.929	30,09	22.708	33,03	21.633
ES100 - 31"	0,75	18.633	40,25	16.900	44,38	15.983
	0,5	17.184	33,93	15.823	36,85	14.705
ES80 - 26"	0,5	15.635	37,24	13.822	42,18	12.204
	0,35	13.613	29,38	12.307	32,5	11.112

PRESTACIONES / PERFORMANCES

VENTILADORES VENTILADORES EOLISTAR	hp	0,00 in H2O	0,04 in H2O	0,08 in H2O	0,12 in H2O
		CFM	CFM/W	CFM	CFM/W
ES200 - 69"	2,5	45.484	19,78	43.776	19,03
	2	42.595	20,28	40.909	19,48
ES150 - 55"	2	30.135	14,35	29.614	14,1
	1,5	28.008	16,47	27.118	15,95
ES140 - 51"	1,5	24.298	14,29	22.705	13,39
	1	22.332	18,61	21.078	17,56
ES120 - 39"	1	15.967	13,31	15.246	12,71
	0,75	14.684	19,55	13.958	17,81
ES100 - 31"	0,75	10.961	14,61	9.941	13,25
	0,5	10.108	17,34	9.308	15,97
ES80 - 26"	0,5	9.299	15,8	8.131	13,95
	0,35	8.066	20,62	7.239	18,1

Los ventiladores han sido probados según la norma UNI 7179/73P.

Las especificaciones técnicas podrán ser modificadas sin previo aviso para mejorarlas.

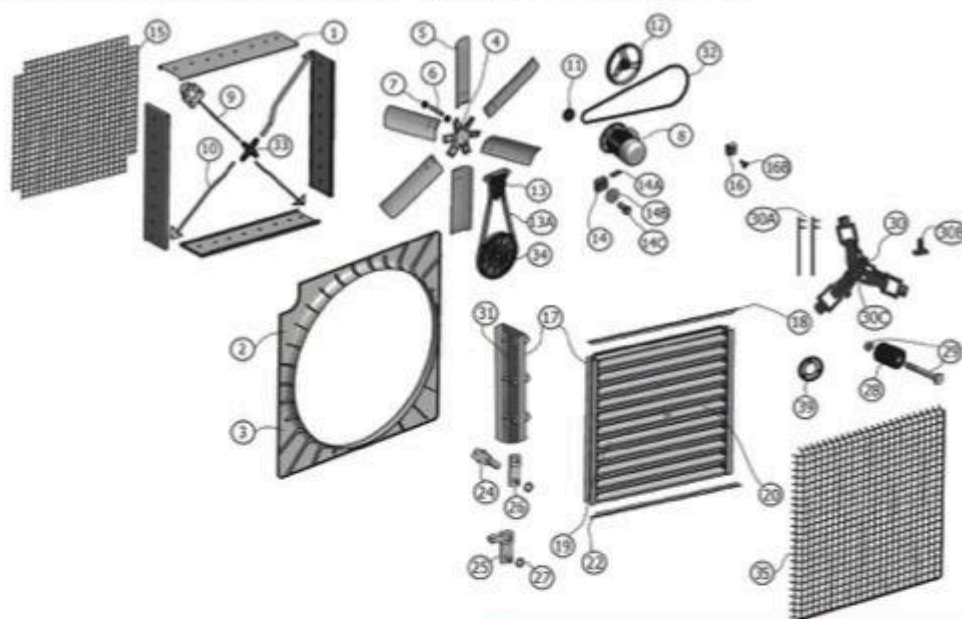
Les ventilateurs ont été testés selon la norme UNI 7179-73P.

Les spécifications techniques peuvent faire l'objet de modifications sans préavis pour leur amélioration.

* El nivel de presión acústica LpA medido a 2 m con modalidad de ejecución de acuerdo con el estándar ISO 3744.

* Niveau de pression sonore LpA mesuré à 2 m avec méthode d'exécution selon la norme ISO 3744.

PLANO DE DESPIECE / DESSIN ÉCLATÉ



COMPONENTES DE LOS VENTILADORES

1	Panel para caja	18	Angular superior
2	Boca Venturi 2*	19	Lámina 19 (normal)
3	Boca Venturi 3	20	Lámina 20 (con agujeros)
4	Buje para álabes	21	Lámina 21**
5	Álabe*****	22	Angular inferior
6	Distanciador	24	Articulación lámina
7	Cojinete	25	Palanca 25
8	Motor	26	Palanca 26
9	Bras 9 (Motor)	27	Star Lock***
10	Bras 10 (Normal)	28	Peso
11	Polea 11 (pequeña)	29	Perno y tuerca
12	Polea 12 (grande)	30	Sistema centrífugo
13	Cubre polea	30A	Pareja de varillas
13A	Cubre correa	30B	Pie de apoyo
14	Arandela Cuadrada	30C	Protección cojinete
14A	Llave Buje	31	Racor articulaciones
14B	Arandela Redonda	32	Correa
14C	Perno Buje	33	Casquillo Cruciforme
15	Rejilla con ángulos cortados	34	Protección polea
16	Inserto	35	Rejilla protecc. Persian****
17	Costado persiana	39	Arandela****

* Este componente es solo para modelos ES120, ES150, ES200.

** Este componente es solo para ventiladores ES100 fabricados antes de 2012.

*** Este componente es solo para ventiladores fabricados antes de 2004.

**** Este componente solo es necesario en algunos países.

Consulte la normativa vigente en su propio país.

***** Para modelos rejilla/persiana (sin cono), este componente solo es para ES200

***** Especificar si álabe de modelo viejo o nuevo

COMPOSANTS DES VENTILATEURS

1	Panneau pour caisse	18	Cornière supérieure
2	Embout Venturi 2*	19	Lamelle 19 (normale)
3	Embout Venturi 3	20	Lamelle 20 (perforée)
4	Moyeu pour pales	21	Lamelle 21**
5	Pale*****	22	Cornière inférieure
6	Entretoise	24	Articulation lamelle
7	Roulement	25	Levier 25
8	Moteur	26	Levier 26
9	Bras 9 (moteur)	27	Rondelle crantée***
10	Bras 10 (normal)	28	Poids
11	Poulie 11 (petite)	29	Boulon et écrou
12	Poulie 12 (grande)	30	Système centrifuge
13	Carter de poulie	30A	Paire de tiges
13A	Carter de courroie	30B	Pied
14	Rondelle carrée	30C	Protection du roulement
14A	Clavette de moyeu	31	Raccord articulations
14B	Rondelle ronde	32	Courroie
14C	Boulon de moyeu	33	Croisillon central
15	Grille coupée	34	Protection de poulie
16	Insert	35	Grille de protection Volets****
17	Flanc du volet	39	Rondelle*****

* Ce composant est uniquement pour les modèles ES120, ES150, ES200.

** Ce composant est uniquement pour les ventilateurs ES100 fabriqués avant 2012.

*** Ce composant est uniquement pour les ventilateurs fabriqués avant 2004.

**** Ce composant est nécessaire uniquement dans certains pays.

Consultez les normes en vigueur dans le pays.

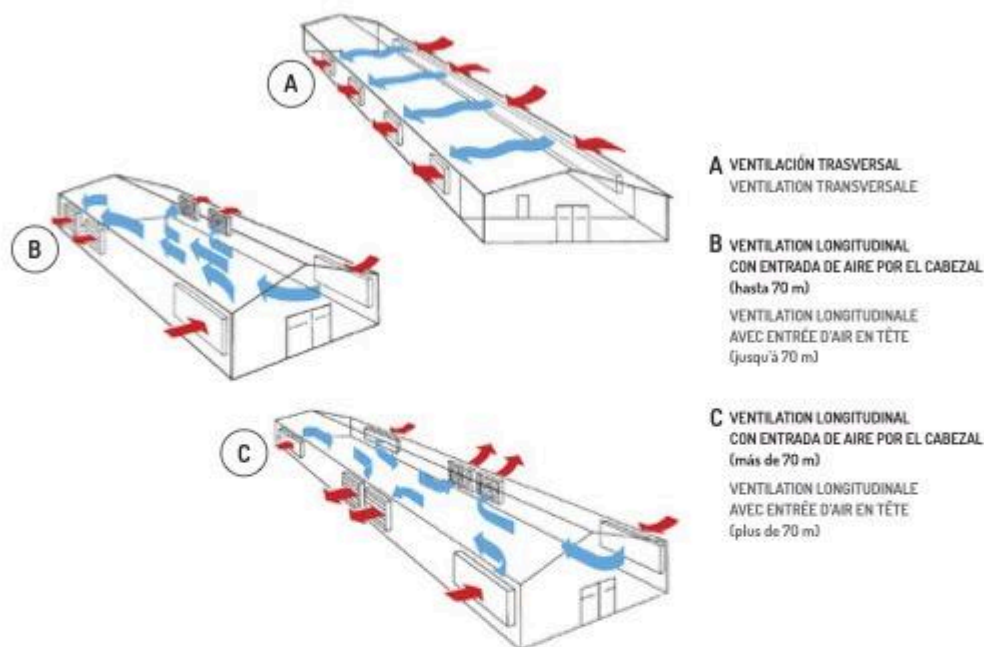
***** Pour les modèles à grille/volet (sans cône), ce composant est uniquement pour les ventilateurs ES200

***** Spécifier si la pale est un ancien ou nouveau modèle

ADVERTENCIA: Para sus pedidos de piezas de repuesto, comuníquese el modelo de ventilador (ej. ES 80 R/S o R/R, ES 100 R/S o R/R, etc.) y el número de referencia de la pieza.

AVIS : Pour vos demandes de pièces de rechange, veuillez communiquer le modèle de ventilateur (par ex. ES 80 R/S ou R/R, ES 100 R/S ou R/R, etc.) et le numéro de référence de la pièce.

ESQUEMAS DE APLICACIÓN SCHÉMAS D'APPLICATION



A VENTILACIÓN TRASVERSAL
VENTILATION TRANSVERSALE

B VENTILATION LONGITUDINAL
CON ENTRADA DE AIRE POR EL CABEZAL
(hasta 70 m)
VENTILATION LONGITUDINALE
AVEC ENTRÉE D'AIR EN TÊTE
(jusqu'à 70 m)

C VENTILATION LONGITUDINAL
CON ENTRADA DE AIRE POR EL CABEZAL
(más de 70 m)
VENTILATION LONGITUDINALE
AVEC ENTRÉE D'AIR EN TÊTE
(plus de 70 m)

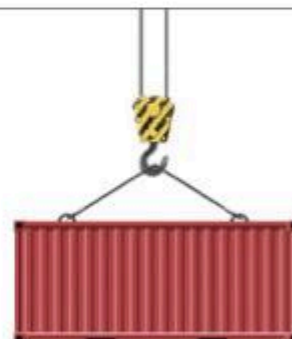
POSIBILIDAD DE CARGA / POSSIBILITÉ DE CHARGE

VENTILADORES MONTADOS VENTILATEURS MONTÉS

TIPO TYPE	1X 20' BOX	1X 40' BOX / H.C.
ES200 R/S	15	30
ES140 R/S	30	61
ES120 R/S	56	112
ES100 R/S	76	152
ES80 R/S	84	168

VENTILADORES DESMONTADOS VENTILATEURS DÉMONTÉS

TIPO TYPE	1X 20' BOX	1X 40' BOX / H.C.
ES200 R/S	75	150
ES140 R/S	150	300
ES120 R/S	250	450
ES100 R/S	350	500
ES80 R/S	450	600



GIGOLA E RICCARDI S.p.A.

VENTILADORES VENTILATEURS

Domicilio legal y fabricación de ventiladores
Siège social et fabrication de ventilateurs
25046 Cazzago San Martino (BS) ITALY
Via Alessandro Volta, 7
Tel. 0039 030 725368
Fax 0039 030 7255438

info@gigolariccardi.it - www.gigolariccardi.it

PANEL EVAPORATIVO COOLING

PANNEAU ÉVAPORANT DE REFROIDISSEMENT

Producción de paneles evaporativos
Fabrication de panneaux évaporants
25030 Erbusco (BS) ITALY
Via dell'Industria, 41
Tel. 0039 030 7242316
Fax 0039 030 7248406

Gigola®



PERSIANA DE GRAVEDAD / TOMA DE AIRE + ACTUADOR (OPCIONAL)

Para granjas de ganado, invernaderos e industrias

VOLET À GRAVITÉ / PRISE D'AIR + ACTIONNEUR (OPTIONNEL)

Pour élevages, serres et industries

Nuestra persiana / toma de aire está realizada en chapa de hierro galvanizada con alta protección contra la corrosión. El producto estándar es una persiana de gravedad que trabaja con el flujo de aire del ventilador gracias al peso moderado de las láminas y al perfecto equilibrio entre ellas.

La apertura de la persiana se puede controlar a través de un actuador que podemos suministrar como opción.

Notre volet / prise d'air est produite en tôle de fer galvanisée avec une protection élevée contre la corrosion. Le produit standard est un volet à gravité qui fonctionne avec le flux d'air du ventilateur grâce au poids contenu des lamelles et l'équilibre parfait entre celles-ci.

L'ouverture du volet peut être contrôlée par un actionneur pouvant être fourni en option.



GIGOLA E RICCARDI S.p.A.

VENTILADORES

VENTILATEURS

Domicilio legal y fabricación de ventiladores

Siège social et fabrication de ventilateurs

25046 Cazzago San Martino (BS) ITALY

Via Alessandro Volta, 7

Tel. 0039 030 725368

Fax 0039 030 7255438

info@gigolariccardi.it - www.gigolariccardi.it

PANEL EVAPORATIVO COOLING

PANNEAUX DE REFROIDISSEMENT ÉVAPORANT

Producción de paneles evaporativos

Fabrication de panneaux évaporants

25030 Erbusco (BS) ITALY

Via dell'Industria, 41

Tel. 0039 030 7242316

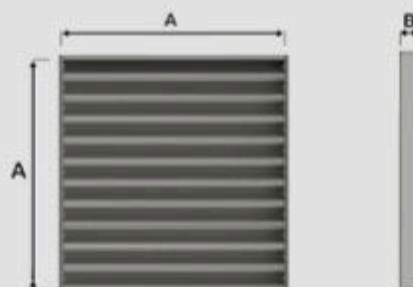
Fax 0039 030 7248406



MADE IN ITALY

Gigola®

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES



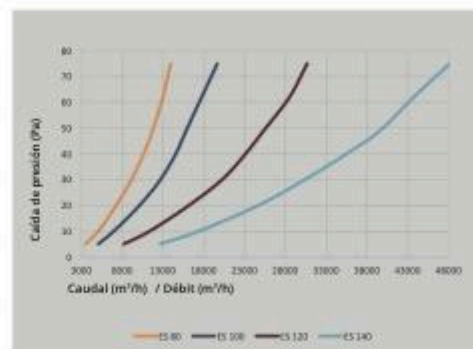
DIMENSIONES / DIMENSIONS

TIPO / TYPE	ALTURA / HAUTEUR (A)	ANCHURA / LARGEUR (A)	ESPESOR / ÉPAISSEUR (B)
PERSIANA ES 140 / VOLET ES 140	1337 mm	1337 mm	85 mm
PERSIANA ES 120 / VOLET ES 120	1110 mm	1110 mm	85 mm
PERSIANA ES 100 / VOLET ES 100	920 mm	920 mm	85 mm
PERSIANA ES 80 / VOLET ES 80	770 mm	770 mm	85 mm



CAÍDA DE PRESIÓN / CHUTE DE PRESSION

PERSIANA VOLET	ES 80	ES 100	ES 120	ES 140
5 Pa	3.486	5.066	8.216	12.665
10 Pa	5.076	6.966	11.376	17.414
20 Pa	7.275	10.132	16.179	24.697
30 Pa	9.146	12.690	20.244	30.396
40 Pa	10.628	14.565	23.114	35.462
48 Pa	11.715	15.831	25.330	39.578
62 Pa	12.982	17.731	28.496	43.694
75 Pa	13.931	19.650	30.653	48.127



Gigola®

Annexe 5 : Fiche technique des tuyaux microporeux utilisés pour l'ensemble des dispositifs de culture de la plateforme WASABI.

Micro-irrigation

VISA[®]reg

Tuyau poreux

- Tuyaux poreux de surface ou à enterrer (de 20 à 65 cm). Très bonne résistance et durée de vie. Prévu pour les haies, jardins, espaces verts, l'horticulture, pépinières.
- Débit 2 l/h/m à 0,8 bar. Pression conseillée : 0,6 à 0,8 bar (maximum 2 bar).
- Longueur maximale : 100 m
- Pour eau claire uniquement



N° article	Rouleau de	ø	Embo.	Embo/cart.	Prix TTC	TVA
A4.13.125	50 m	13/16 mm	pc	I	81,00	21

www.jinkosolar.com



Tiger Neo N-type 72HL4-BDV 550-570 Watt BIFACIAL MODULE WITH DUAL GLASS

N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

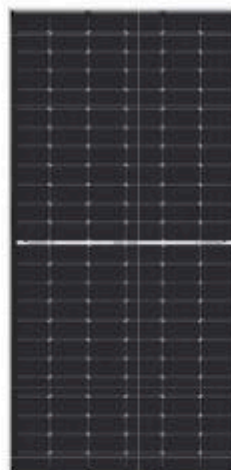
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



Key Features



SMBB Technology

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



Hot 2.0 Technology

The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETID.



PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



Enhanced Mechanical Load

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

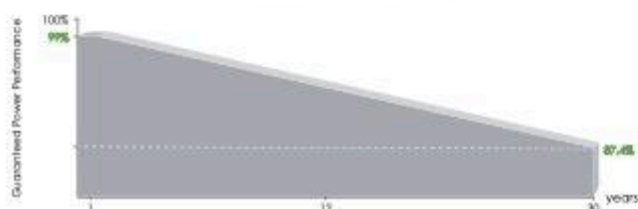


Higher Power Output

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



LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

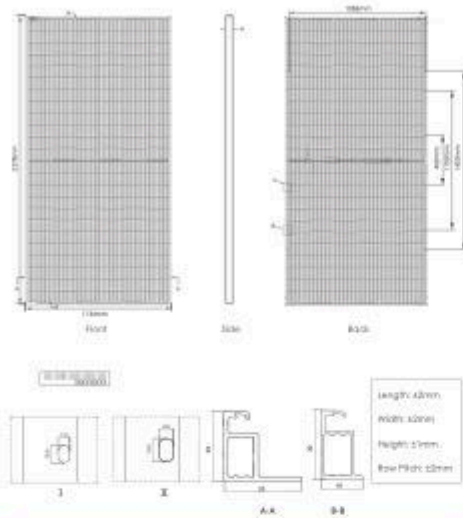


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.40% Annual Degradation Over 30 years

Engineering Drawings



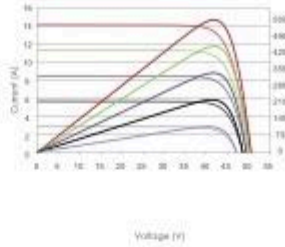
Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

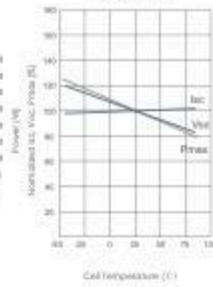
36pcs/pallets, 72pcs/stack, 720pcs/ 40HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (560W)



Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax



Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6*24)
Dimensions	2278*1134*30mm (89.69*44.65*1.18 inch)
Weight	32 kg (70.55 lbs)
Front Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0mm, Heat Strengthened Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	10V 1*4.0mm (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM550N-72HL4-8DV		JKM555N-72HL4-8DV		JKM560N-72HL4-8DV		JKM565N-72HL4-8DV		JKM570N-72HL4-8DV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	550Wp	414Wp	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.58V	39.13V	41.77V	39.26V	41.95V	39.39V	42.14V	39.52V	42.29V	39.65V
Maximum Power Current (Imp)	13.23A	10.57A	13.29A	10.63A	13.35A	10.69A	13.41A	10.75A	13.48A	10.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	50.27V	47.75V	50.47V	47.94V	50.67V	48.13V	50.87V	48.32V	51.07V	48.51V
Short-circuit Current (Isc)	14.01A	11.31A	14.07A	11.36A	14.13A	11.41A	14.19A	11.46A	14.25A	11.50A
Module Efficiency STC (%)	21.29%		21.48%		21.68%		21.87%		22.07%	
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	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.23%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	80±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REARSIDE POWER GAIN

5%	Maximum Power (Pmax)	578Wp	583Wp	588Wp	593Wp	599Wp
	Module Efficiency STC (%)	22.36%	22.56%	22.77%	22.97%	23.17%
15%	Maximum Power (Pmax)	633Wp	638Wp	644Wp	650Wp	656Wp
	Module Efficiency STC (%)	24.48%	24.71%	24.93%	25.15%	25.37%
25%	Maximum Power (Pmax)	688Wp	694Wp	700Wp	706Wp	713Wp
	Module Efficiency STC (%)	26.61%	26.84%	27.10%	27.34%	27.58%

*STC: Irradiance 1000W/m²

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m²

Ambient Temperature 20°C

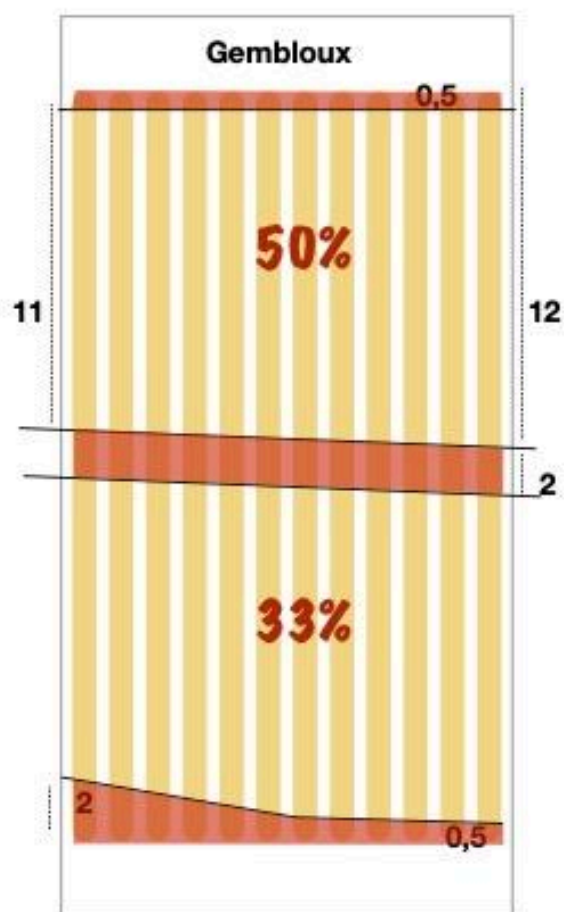
AM=1.5

Wind Speed 1m/s

©2021 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.
Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM550-570N-72HL4-8DV-F1-EN (IEC 616)

Annexe 7 : Cartographie des zones correspondant aux modalités 33 % et 50 % de la serre avec panneaux photovoltaïques (GH_PV).



Annexe 8 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques du dispositif de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV).

www.jinkosolar.com

Jinko Solar
Building Your Trust in Solar

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

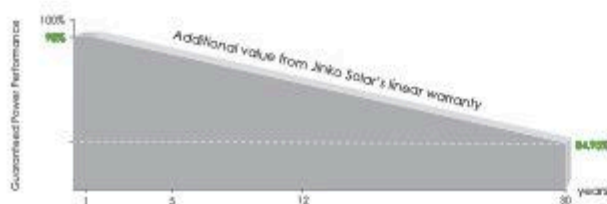


Bifacial Technology

Key Features

 <p>Multi Busbar Technology Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.</p>	 <p>Longer Life-time Power Yield 0.45% annual power degradation and 30 year linear power warranty.</p>
 <p>Light-weight design Light-weight design using transparent backsheet for easy installation and low BOS cost.</p>	 <p>Enhanced Mechanical Load Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).</p>
 <p>Higher Power Output Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.</p>	<p>      </p>

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

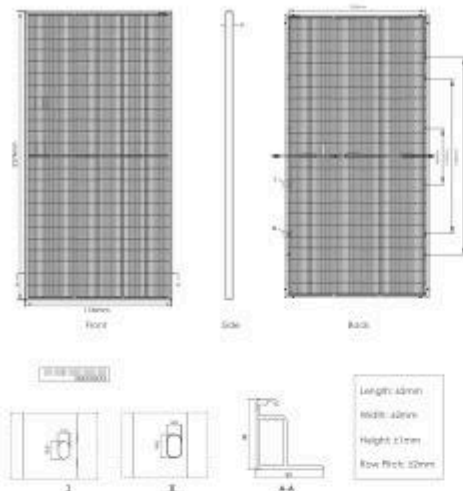


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.45% Annual Degradation Over 30 years

Engineering Drawings



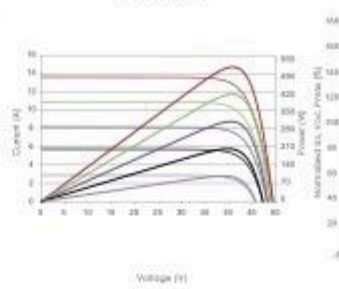
Packaging Configuration

[Two pallets = One stack]

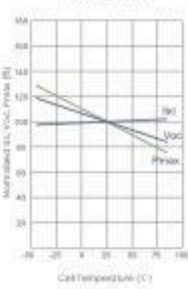
31pcs/pallets, 62pcs/stack, 620pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence

Current-Voltage & Power-Voltage Curves (535W)



Temperature Dependence of I_{sc} , V_{oc} , P_{max}



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 ² , (+): 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 (P _{max})	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp
Maximum Power Voltage (V _{mp})	40.61V	37.74V	40.71V	37.88V	40.81V	37.98V	40.91V	38.08V	41.07V	38.18V
Maximum Power Current (I _{mp})	12.93A	10.35A	13.02A	10.41A	13.11A	10.48A	13.20A	10.55A	13.27A	10.62A
Open-circuit Voltage (V _{oc})	49.27V	46.50V	49.35V	46.58V	49.42V	46.65V	49.49V	46.71V	49.65V	46.86V
Short-circuit Current (I _{sc})	13.66A	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 P _{max}	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of V _{oc}	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of I _{sc}	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		5%	15%	25%
5%	Maximum Power (P _{max})	551Wp	557Wp	562Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.38%	21.58%	21.78%
15%	Maximum Power (P _{max})	604Wp	610Wp	615Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.41%	23.64%	23.86%
25%	Maximum Power (P _{max})	656Wp	663Wp	669Wp
	Module Efficiency STC (%)	25.45%	25.69%	25.93%

*STC: Irradiance 1000W/m²

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m²

Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

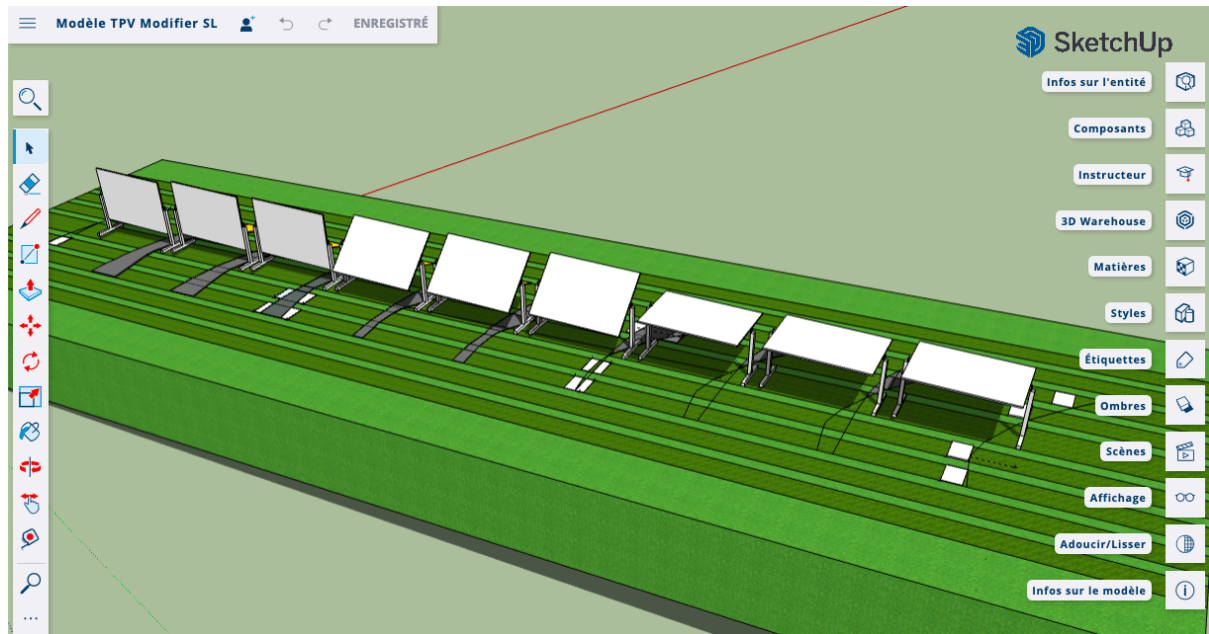
Wind Speed 1m/s

©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

Annexe 9 : Modélisation 3D du dispositif expérimental de culture extérieure avec panneaux photovoltaïques (OF_PV)

Ce modèle 3D a été créé sur le logiciel SketchUp par Arthur Libault et utilisé par Solenn Lecat pour déterminer les zones tampons ainsi que les planches de culture des différentes modalités, en fonction des ombrages créés par les panneaux photovoltaïques.





CALCAIRE VERT® DCM

VN 50 – 15 % MgO



■ Composition

ENGRAIS CALCAIRE GRANULE
CARBONATE DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM

Valeur neutralisante (VN) 50 %
Oxyde de magnésium (MgO) soluble dans les acides minéraux 15 %

Finesse déterminée par tamisage de 0,160mm par voie humide : 90 %

Utilisable en agriculture biologique [contient uniquement des matières premières mentionnées dans l'annexe I du règlement CE n° 889/2008 concernant le mode de production biologique et ses modifications]

■ Caractéristiques

- augmente rapidement le pH du sol (= désacidification rapide), grâce à sa valeur neutralisante élevée (VN 50)
- avec 15 % de magnésium (MgO) pour un feuillage vert intense et une bonne photosynthèse
- améliore la structure du sol grâce à la formation de complexes argile-Ca⁺⁺-humus
- des cellules végétales renforcées grâce au Ca⁺⁺
- stimule la vie microbienne présente
- bonne croissance grâce à la meilleure assimilation des éléments nutritifs
- avantage supplémentaire pour les gazons: réduit la formation de mousses grâce à son effet déshydratant et à la croissance améliorée de l'herbe

■ Forme

Engrais calcaire en **granulé** facilement applicable et parfaitement soluble.



FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ

conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

COMPO BIO Anti-Limaces



Version
10.1

Date de révision:
26.01.2023

Numéro de la FDS:
C5364

Date de dernière parution:
17.01.2022

Date de la première version publiée:
17.01.2022

FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ

conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

COMPO BIO Anti-Limaces



Version
10.1

Date de révision:
26.01.2023

Numéro de la FDS:
C5364

Date de dernière parution:
17.01.2022

Date de la première version publiée:
17.01.2022

RUBRIQUE 1: Identification de la substance/du mélange et de la société/l'entreprise

1.1 Identificateur de produit

Nom commercial
Code du produit

:
:

COMPO BIO Anti-Limaces
000000002364406017

1.2 Utilisations identifiées pertinentes de la substance ou du mélange et utilisations déconseillées

Utilisation de la substance/du mélange

:

Ménages privés (=public général=consommateurs)
Produits phytopharmaceutiques
Molluscicides

Restrictions d'emploi recommandées

:

À n'utiliser qu'en cas de besoin reconnu. Ne pas dépasser les doses adéquates.

1.3 Renseignements concernant le fournisseur de la fiche de données de sécurité

Société

:

COMPO Benelux nv
Venecolaan 56
B-3880 Aalter

Téléphone

:

+32-09/311 00 00

Téléfax

:

+32-09/298 09 49

Adresse e-mail de la personne responsable de FDS

:

compo@compo.be

1.4 Numéro d'appel d'urgence

Service technique aux consommateurs

Téléphone:

+32(0)9/311.00.14

RUBRIQUE 2: Identification des dangers

2.1 Classification de la substance ou du mélange

Classification (RÈGLEMENT (CE) No 1272/2008)

:

N'est pas une substance ni un mélange dangereux conformément au règlement (CE) No. 1272/2008.

2.2 Éléments d'étiquetage

Étiquetage (RÈGLEMENT (CE) No 1272/2008)

:

Respectez les instructions d'utilisation pour les Dangers

Informations Additionnelles

:

EUH401 évitez les risques pour l'homme et l'environnement.

Conseils de prudence

:

P101 En cas de consultation d'un médecin, garder à disposition le récipient ou l'étiquette.
P102 Tenir hors de portée des enfants.

2.3 Autres dangers

Cette substance/ce mélange ne contient aucun ingrédient considéré comme persistant, bio-accumulable et toxique (PBT), ou très persistant et très bio-accumulable (vPvB) à des niveaux de 0,1% ou plus.

Informations écologiques: La substance/Le mélange ne contient pas de composants considérés comme ayant des propriétés perturbatrices du système endocrinien selon l'article 57(f) de REACH ou le règlement délégué de la Commission (UE) 2017/2100 ou le règlement de la Commission (EU) 2018/605 à des niveaux de 0,1 % ou plus.

Informations toxicologiques: La substance/Le mélange ne contient pas de composants considérés comme ayant des propriétés perturbatrices du système endocrinien selon l'article 57(f) de REACH ou le règlement délégué de la Commission (UE) 2017/2100 ou le règlement de la Commission (EU) 2018/605 à des niveaux de 0,1 % ou plus.

RUBRIQUE 3: Composition/informations sur les composants

3.2 Mélanges

Composants

Nom Chimique	No.-CAS No.-CE No.-Index Numéro d'enregistrement	Classification	Concentration (% w/w)
Aucun ingrédient dangereux : orthophosphate de fer	10045-86-0 233-149-7		< 1,5

Pour l'explication des abréviations voir rubrique 16.

RUBRIQUE 4: Premiers secours

4.1 Description des premiers secours

En cas d'inhalation

:

Amener la victime à l'air libre.
Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.

En cas de contact avec la peau

:

Laver au savon avec une grande quantité d'eau.
Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.

En cas de contact avec les yeux

:

Enlever les lentilles de contact.
Rincer immédiatement et abondamment à l'eau, y compris sous les paupières, pendant au moins 15 minutes.

85

FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ
conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

COMPO BIO Anti-Limaces



Version 10.1 Date de révision: 26.01.2023 Numéro de la FDS: C5364 Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022

En cas d'ingestion : Si l'irritation oculaire persiste, consulter un médecin spécialiste.
: Ne PAS faire vomir.
Se rincer la bouche à l'eau.
Si les troubles se prolongent, consulter un médecin.

4.2 Principaux symptômes et effets, aigus et différés

Aucune à notre connaissance.

4.3 Indication des éventuels soins médicaux immédiats et traitements particuliers nécessaires

Traitement : Traiter de façon symptomatique.

RUBRIQUE 5: Mesures de lutte contre l'incendie

5.1 Moyens d'extinction

Moyens d'extinction appropriés : Le produit est compatible avec les agents standards de lutte contre le feu.

5.2 Dangers particuliers résultant de la substance ou du mélange

Dangers spécifiques pendant la lutte contre l'incendie : La combustion produira une fumée dense et noire contenant des produits de combustion dangereux (voir chapitre 10).
En cas d'incendie et/ou d'explosion, ne pas respirer les fumées.

5.3 Conseils aux pompiers

Équipements de protection particuliers des pompiers : Utiliser un équipement de protection individuelle. Porter un appareil de protection respiratoire autonome pour la lutte contre l'incendie, si nécessaire.

Information supplémentaire

: Empêcher les eaux d'extinction du feu de contaminer les eaux de surface ou le réseau d'alimentation souterrain.
Les résidus d'incendie et l'eau d'extinction contaminée doivent être éliminés conformément à la réglementation locale en vigueur.

RUBRIQUE 6: Mesures à prendre en cas de dispersion accidentelle

6.1 Précautions individuelles, équipement de protection et procédures d'urgence

Précautions individuelles : Pas de précautions spéciales requises.
: Éviter le contact avec la peau, les yeux et les vêtements.

6.2 Précautions pour la protection de l'environnement

Précautions pour la protection de l'environnement : Ne pas déverser dans des eaux de surface ou dans les égouts.

3 / 13

FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ
conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

COMPO BIO Anti-Limaces



Version 10.1 Date de révision: 26.01.2023 Numéro de la FDS: C5364 Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022

6.3 Méthodes et matériel de confinement et de nettoyage

Méthodes de nettoyage : Utiliser un équipement de manutention mécanique.
: Éviter tout contact avec la peau, les yeux et les vêtements.
Essuyer avec une matière absorbante (p.ex. tissu, laine).
Après le nettoyage, rincer les traces avec de l'eau.

6.4 Référence à d'autres rubriques

Pour l'équipement de protection individuel, voir rubrique 8., Pour des considérations sur l'élimination, voir la section 13.

RUBRIQUE 7: Manipulation et stockage

7.1 Précautions à prendre pour une manipulation sans danger

Conseils pour une manipulation sans danger : Prendre connaissance du mode d'emploi sur l'étiquette.
: Manipuler conformément aux bonnes pratiques d'hygiène industrielle et aux consignes de sécurité.
Éviter le contact avec la peau, les yeux et les vêtements.
Éviter de respirer les vapeurs ou le brouillard.
Se laver les mains avant les pauses et à la fin de la journée de travail.

Indications pour la protection contre l'incendie et l'explosion : Tenir à l'abri des flammes nues, des surfaces chaudes et des sources d'inflammation.

Mesures d'hygiène

: Pratiques générales d'hygiène industrielle. Se laver les mains avant les pauses et à la fin de la journée de travail. Éviter le contact avec la nourriture et la boisson.

7.2 Conditions d'un stockage sûr, y compris d'éventuelles incompatibilités

Exigences concernant les aires de stockage et les contenueurs : Conserver hors de portée des enfants. Conserver dans le conteneur d'origine. Conserver hermétiquement fermé dans un endroit sec, frais et bien ventilé.

Précautions pour le stockage en commun : Éviter le contact avec la nourriture et la boisson.
: Tenir éloigné des agents oxydants, des acides forts ou des alcalis.

Classe de stockage (Allemagne) (TRGS 510) : 13. Substances solides non combustibles

Température de stockage recommandée : 5 - 30 °C

7.3 Utilisation(s) finale(s) particulièr(e)s

Utilisation(s) particulière(s) : Avant toute utilisation, lisez l'étiquette et les informations concernant.

4 / 13

Version 10.1	Date de révision: 26.01.2023	Número de la FDS: C5364	Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022
RUBRIQUE 8: Contrôles de l'exposition/protection individuelle			
8.1 Paramètres de contrôle Ne contient pas de substances avec des valeurs limites d'exposition professionnelle.			
8.2 Contrôles de l'exposition Équipement de protection individuelle Protection des yeux/du visage : inutile dans les conditions normales d'utilisation Éviter le contact avec les yeux. Protection des mains : inutile dans les conditions normales d'utilisation Nettoyer soigneusement la peau après tout contact avec le produit. Protection de la peau et du corps : Vêtements de protection à manches longues Protection respiratoire : non requis Ne pas respirer les vapeurs ou le brouillard de pulvérisation.			
RUBRIQUE 9: Propriétés physiques et chimiques			
9.1 Informations sur les propriétés physiques et chimiques essentielles			
État physique	: granuleux		
Couleur	: bleu-vert		
Odeur	: caractéristique		
Point de fusion/point de congélation	: Donnée non disponible		
Point initial d'ébullition et intervalle d'ébullition	: Donnée non disponible		
Inflammabilité	: Ne brûle pas Méthode: Règlement (CE) n° 440/2008, annexe, A.10		
pH	: 7,45 (20 °C) Concentration: 10 g/l Méthode: CIPAC MT 75.3		
Solubilité(s) Hydrosolubilité	: légèrement soluble		
Pression de vapeur	: Donnée non disponible		

Version 10.1	Date de révision: 26.01.2023	Número de la FDS: C5364	Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022
RUBRIQUE 10: Stabilité et réactivité			
10.1 Réactivité Pas de réactions dangereuses connues dans les conditions normales d'utilisation.			
10.2 Stabilité chimique Pas de décomposition si le produit est entreposé et utilisé selon les prescriptions.			
10.3 Possibilité de réactions dangereuses Réactions dangereuses : Pas de réactions dangereuses connues dans les conditions normales d'utilisation.			
10.4 Conditions à éviter Conditions à éviter : Protéger du gel, de la chaleur et du soleil.			
10.5 Matières incompatibles Matières à éviter : Acides forts et bases fortes Oxydants forts			
10.6 Produits de décomposition dangereux En cas d'incendie des produits de décomposition dangereux peuvent se former, comme: Dioxyde de carbone (CO ₂), monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO _x), fumée dense et noire.			
RUBRIQUE 11: Informations toxicologiques			
11.1 Informations sur les classes de danger telles que définies dans le règlement (CE) no 1272/2008			
Toxicité aiguë Produit: Toxicité aiguë par voie orale : DL50 (Rat) > 5.000 mg/kg Méthode: OCDE ligne directrice 423			

Version	Date de révision:	Numéro de la FDS:	Date de dernière parution:
10.1	26.01.2023	C5364	17.01.2022
			Date de la première version publiée: 17.01.2022

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition unique

Produit:

Remarques : Non classé

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - exposition répétée

Remarques:

Informations sur les autres dangers
Propriétés perturbant le système endocrinien

Evaluation

considérés comme ayant des propriétés perturbatrices au système endocrinien selon l'article 57(f) de REACH ou le règlement délégué de la Commission (UE) 2017/2100 ou le règlement de la Commission (EU) 2018/605 à des niveaux de 0,1 % ou plus.

Information supplémentaire

Produit:

Remarques

: Aucun risque pour la santé n'est connu ni prévisible dans les conditions normales d'utilisation.

RUBRIQUE 12: Informations écologiques

Produit:
Toxicité pour les poissons

: Cl50 (Oncorhynchus mykiss (Truite arc-en-ciel)): > 100 mg/l

Durée d'exposition: 96 h

Type de Test: Essai en statique

Méthode: OCDE ligne directrice 203

Toxicité pour la daphnie et
 autres invertébrés aqua-
 liques
 : CE50 (Daphnia magna (Grande daphnie)) : > 100 mg/l
 Durée d'exposition: 48 h
 Type de Test: Immobilisation
 Méthode: OCDE Ligne directrice 202

: CE50r (*Pseudokirchneriella subcapitata* (algues vertes)) :
 : Toxicité pour les :
 : algues/plantes aquatiques :
 :
 : Durée d'exposition: 72 h :
 : Type de Test: Inhibition de la croissance :
 : Méthode: OCDE Ligne directrice 201 :

Version 10.1	Date de révision: 26.01.2023	Numéro de la FDS: CS364	Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022
<div>Toxicité pour les organismes terrestres</div> <div><div>DL50: > 64,1 µg/abeille</div><div>Durée d'exposition: 24 h</div><div>Espèce: Apis mellifera (abeilles)</div><div>Méthode: OCDE ligne directrice 213</div></div> <div><div>DL50: > 46,2 µg/abeille</div><div>Durée d'exposition: 24 h</div><div>Espèce: Apis mellifera (abeilles)</div><div>Méthode: OCDE ligne directrice 214</div></div>			
<div>12.2 Persistance et dégradabilité</div> <div>Donnée non disponible</div>			
<div>12.3 Potentiel de bioaccumulation</div> <div>Donnée non disponible</div>			
<div>12.4 Mobilité dans le sol</div> <div>Donnée non disponible</div>			
<div>12.5 Résultats des évaluations PBT et vPVB</div> <div><div>Produit:</div><div>Evaluation</div><div>: Cette substance/ce mélange ne contient aucun ingrédient considéré comme persistant, bio-accumulable et toxique (PBT), ou très persistant et très bio-accumulable (vPVB) à des niveaux de 0,1% ou plus.</div></div>			
<div>12.6 Propriétés perturbant le système endocrinien</div> <div><div>Produit:</div><div>Evaluation</div><div>: La substance/le mélange ne contient pas de composants considérés comme ayant des propriétés perturbatrices du système endocrinien selon l'article 57(f) de REACH ou le règlement délégué de la Commission (UE) 2017/2100 ou le règlement de la Commission (EU) 2018/605 à des niveaux de 0,1 % ou plus.</div></div>			
<div>12.7 Autres effets néfastes</div> <div>Donnée non disponible</div>			
<div>RUBRIQUE 13: Considérations relatives à l'élimination</div>			
<div>13.1 Méthodes de traitement des déchets</div> <div><div>Produit</div><div>: Ne pas déverser dans des eaux de surface ou dans les égouts.</div><div>Éliminer le produit dans une déchetterie ou par un organisme agréé.</div><div>Les numéros de code des déchets sont les recommandations du fabricant en fonction de l'utilisation prévue du produit.</div></div>			

Version 10.1	Date de révision: 26.01.2023	Numéro de la FDS: CS364	Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022
<div>Emballages contaminés</div> <div>: Catalogue Européen des Déchets: 20 01 19* Pesticides</div> <div>: Ne pas réutiliser des réipients vides.</div> <div>: Éliminer le récipient dans une déchetterie ou par un organisme agréé.</div>			
<div>RUBRIQUE 14: Informations relatives au transport</div>			
<div>14.1 Numéro ONU ou numéro d'identification</div> <div><div>ADN</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>ADR</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>RID</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IMDG</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IATA</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div>			
<div>14.2 Désignation officielle de transport de l'ONU</div> <div><div>ADN</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>ADR</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>RID</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IMDG</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IATA</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div>			
<div>14.3 Classe(s) de danger pour le transport</div> <div><div>ADN</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>ADR</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>RID</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IMDG</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IATA</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div>			
<div>14.4 Groupe d'emballage</div> <div><div>ADN</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>ADR</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>RID</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IMDG</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IATA (Cargo)</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div> <div><div>IATA (Passager)</div><div>: Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div></div>			
<div>14.5 Dangers pour l'environnement</div> <div>Non réglementé comme étant une marchandise dangereuse</div>			

Version
10.1

Date de révision:
26.01.2023

Numéro de la FDS:
C5364

Date de dernière parution:
17.01.2022

Date de la première version publiée:
17.01.2022

- 14.6 Précautions particulières à prendre par l'utilisateur
- Non applicable
- 14.7 Transport maritime en vrac conformément aux instruments de l'OMI
- Non applicable pour le produit tel qu'il est fourni.

RUBRIQUE 15: Informations relatives à la réglementation

- 15.1 Réglementations/législation particulières à la substance ou au mélange en matière de sécurité, de santé et d'environnement
- REACH - Restrictions applicables à la fabrication, à la mise sur le marché et à l'utilisation de certaines substances dangereuses et de certains mélanges et articles dangereux (Annexe XVII)
- REACH - Listes des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (Article 59).
- Règlement (CE) N° 649/2012 du Parlement européen et du Conseil concernant les exportations et importations de produits chimiques dangereux
- Règlement (UE) 2019/1021 concernant les polluants organiques persistants (refonte)
- Règlement (CE) N° 1005/2009 relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone
- REACH - Liste des substances soumises à autorisation (Annexe XIV)
- Seveso III: Directive 2012/18/UE du Parlement européen et du Conseil concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses.
- Non applicable
- Non applicable
- Non applicable
- Non applicable
- Non applicable
- Non applicable

- 15.2 Évaluation de la sécurité chimique
- Une Evaluation du Risque Chimique n'est pas exigée pour cette substance.

RUBRIQUE 16: Autres informations

Texte complet pour phrase H

Texte complet pour autres abréviations

ADN - Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures; ADR - Accord relatif au transport international des marchandises

Version
10.1

Date de révision:
26.01.2023

Numéro de la FDS:
C5364

Date de dernière parution:
17.01.2022

Date de la première version publiée:
17.01.2022

dangereuses par la route; AIIIC - Inventaire australien des produits chimiques industriels; ASTM - Société américaine pour les essais de matériaux; bw - Poids corporel; CLP - Règlement relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances; règlement (CE) n° 1272/2008; CMR - Cancérogène, mutagène ou toxique pour la reproduction; DIN - Norme de l'Institut allemand de normalisation; DSL - Liste nationale des substances (Canada); ECHA - Agence européenne des produits chimiques; EC-Number - Numéro de Communauté européenne; ECx - Concentration associée à x % de réponse; ELx - Taux de charge associée à x % de réponse; EmS - Horaire d'urgence; ENCS - Substances chimiques existantes et substances nouvelles (Japon); ErCax - Concentration associée à une réponse de taux de croissance de x %; GHS - Système général harmonisé; GLP - Bonnes pratiques de laboratoire; IARC - Centre international de recherche sur le cancer; IATA - Association du transport aérien international; IBC - Code international pour la construction et l'équipement des navires transportant des produits chimiques dangereux en vrac; IC50 - Concentration inhibitrice demi maximale; ICAO - Organisation de l'aviation civile internationale; IECSC - Inventaire des substances chimiques existantes en Chine; IMDG - Marchandises dangereuses pour le transport maritime international; IMO - Organisation maritime internationale; ISHL - Sécurité industrielle et le droit de la santé (Japon); ISO - Organisation internationale de normalisation; KECI - Inventaire des produits chimiques coréens existants; LC50 - Concentration létale pour 50 % d'une population test; LD50 - Dose létale pour 50 % d'une population par les navires; n.o.s. - Non spécifié; NO(A)EC - Effet de concentration non observé (négatif); NO(A)EL - Effet non observé (nocif); NOELR - Taux de charge sans effet observé; NZIoC - Inventaire des produits chimiques en Nouvelle-Zélande; OECD - Organisation pour la coopération économique et le développement; OPPTS - Bureau de la sécurité chimique et prévention de la pollution; PBT - Persistant, bio-accumulable et toxique; PICCS - Inventaire des produits et substances chimiques aux Philippines; (Q)SAR - Relations structure-activité (quantitative); REACH - Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des produits chimiques; RID - Règlement concernant le transport international des marchandises dangereuses par chemin de fer; SADT - Température de décomposition auto-accelérée; SDS - Fiche de Données de Sécurité; SVHC - substance extrêmement préoccupante; TCSI - Inventaire des substances chimiques à Taiwan; TECI - Répertoire des produits chimiques existants en Thaïlande; TRGS - Règle technique pour les substances dangereuses; TSCA - Loi sur le contrôle des substances toxiques (Etats-Unis); UN - Les Nations Unies; vPvB - Très persistant et très bioaccumulable

- Information supplémentaire
- Conseils relatifs à la formation
- À manipuler conformément aux bonnes pratiques d'hygiène industrielle et aux consignes de sécurité. Voir les rubriques 4, 5, 6, 7, 8, 10 et 13.
- Sources des principales données utilisées pour l'établissement de la fiche de données de sécurité
- L'information donnée provient de travaux qui font référence et de la littérature.

Les informations contenues dans la présente fiche de sécurité ont été établies sur la base de nos connaissances à la date de publication de ce document. Ces informations ne sont données qu'à titre indicatif en vue de permettre des opérations de manipulation, fabrication, stockage, transport, distribution, mise à disposition, utilisation et élimination dans des conditions satisfaisantes de sécurité, et ne sauraient donc être interprétées comme une garantie ou considérées comme des spécifications de qualité. Ces informations ne concernent en outre que le produit nommé-

FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ
conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006



COMPO BIO Anti-Limaces

Version 10.1	Date de révision: 26.01.2023	Numéro de la FDS: C5364	Date de dernière parution: 17.01.2022 Date de la première version publiée: 17.01.2022
ment désigné et, sauf indication contraire spécifique, peuvent ne pas être applicables en cas de mélange dudit produit avec d'autres substances ou utilisables pour tout procédé de fabrication. BE / FR			

Annexe 12 : Description des capteurs et des modules de mesure des paramètres abiotiques présents sur la plateforme WASABI.

4. Agroforesterie

4.1. Matériel

- ELSYS ELT Lite – Antenne LoRaWAN



Instructions d'entretien

Ce capteur fonctionne avec une pile de type ER14505 qui peut être remplacée (tous les 10 ans selon le fabricant).

- Configuration via l'application « Sensor settings » et le tag NFC à l'arrière du capteur
- Protocol de communication : LoRaWAN 1.0.3
- Fréquence utilisée : 863-870 Mhz
- Températures d'utilisation admissibles : -40 à 60 °C
- IP67

- METER TEROS 12 + Step-Up Module – Sonde de température et d'humidité du sol



- Mesure la température et la teneur en eau volumétrique (VWC, le rapport entre le volume d'eau dans un sol et son volume total en m^3/m^3)
- Étendue de mesure (température) : -40 à 60 °C
- Températures d'utilisation admissibles : -40 à 60 °C
- Sortie digitale

- SenseCAP S2102 – Capteur d'intensité lumineuse



Instructions d'entretien

Ce capteur fonctionne avec une pile de type ER34615 qui peut être remplacée (tous les 10 ans selon le fabricant).

- Configuration via l'application SenseCAP Mate avec le Bluetooth
- Étendue de mesure : 0 à 160000 Lux
- Températures d'utilisation admissibles : -40 à 85 °C
- Protocole de communication : LoRaWAN 1.0.3
- Fréquence utilisée : 863-870 Mhz
- IP66

- Laird Sentrius RG1XX – Gateway LoRaWAN



- Températures d'utilisation admissibles : -30 à 70 °C

KERN FKB 8K0.05

KERN

Balance de table à haute résolution avec grande plage de pesée et plateau de pesée en inox robuste



Catégorie

Marque	KERN
Catégorie de produits	Balance d'industrie
Groupe de produit	Balance de table
Famille de produits	FKB

Système de mesure

Type de construction de la balance	Balance à une plage
Système de pesée	Jauge de contrainte
Portée [Max]	8000 g
Lecture [d]	0,05 g
Reproductibilité	0,05 g
Linéarité	± 0,15 g
Résolution	160.000
Possibilités d'ajustage	Ajustement avec poids externe
Poids de réglage recommandé	5 kg (F1); 2 kg (F1); 1 kg (F1)
Points d'ajustage possibles	2 kg; 5 kg; 8 kg
Temps de stabilisation	3 s
Temps de préchauffage	120 min
Charge excentrée à 1/3 [Max]	0,25 g
Fluage maximal (15 minutes)	500 mg
Fluage maximal (30 minutes)	1 g
Unité pré-réglée	g
	kg
	g
	gn
Unités de mesure	dwt
	ozt
	lb
	oz
	ffa

PCS
%

Écran

Écran type	LCD
Écran rétroéclairage	oui
Écran taille	120×38 mm
Écran hauteur de chiffres	25 mm
Langues de l'interface utilisateur	Anglais Langage symbolique

Forme de construction

Dimensions boîtier (L×P×H)	350×390×120 mm
Dimensions surface de pesée (L×P)	340×240 mm
Dimensions surface de pesée	340×240 mm
Dimensions plateforme de pesée (L×P×H)	340×240×21 mm
Matériau boîtier	Plastique ABS
Matériau plateau de pesée	inox
Matériau boîtier de l'écran	Plastiques
Niveau à bulle	✓
Vis de nivellement réglables	✓

Fonctions

Niveau de formule / de sommation	Sum A
Détermination de pourcentage	✓
Fonction de conversion	✓
Pesée de tolérance	✓
Pesée de tolérance - type de signal	acoustique optique
Pesage de charges suspendues	Crochet (inclus dans la livraison)
Fonction de calcul de la valeur moyenne en cas de conditions de pesée instables	✓
Fonction comptage	✓
Résolution de comptage (Conditions de laboratoire)	160.000
Possibilité de saisir le poids de comptage de référence	✓
Poids minimale par pièce au comptage (laboratoire)	50 mg
Poids minimale par pièce au comptage (normal)	500 mg
Quantité de référence	5, 10, 20, 50, n (tout nombre de pièces)
Protection IP - écran	non protection IP
Auto-Off intervalle(s) en fonctionnement sur piles/batteries	5 min 2 min

KERN FKB 8K0.05



Balance de table à haute résolution avec grande plage de pesée et plateau de pesée en inox robuste

	1 min
	30 min
	60 min
	30 sec

Auto-Off intervalle(s) en fonctionnement sur bloc d'alimentation	off
--	-----

Fonction de tare	manuellement (plusieurs fois)
------------------	-------------------------------

Nombre de touches pour l'utilisation	6
--------------------------------------	---

Interface

Interfaces	RS-232 (en option) Ethernet (en option) Bluetooth BLE (v4.0) (en option) USB-Device (en option) KUP WiFi (en option)
compatible avec EasyTouch	✓

Alimentation en énergie

Alimentation fournie	Unité d'alimentation électrique
----------------------	---------------------------------

Bloc d'alimentation type	Bloc d'alimentation
--------------------------	---------------------

Bloc d'alimentation / adaptateur pour les pays - compris dans la livraison	EURO UK US CH
--	------------------------

Bloc d'alimentation / adaptateur pour les pays - en option	EURO UK US CH
--	------------------------

Tension d'entrée bloc d'alimentation / électricité [Max]	100 V - 240 V AC, 50 / 60 Hz
--	------------------------------

Tension d'entrée bloc d'alimentation / courant [Max]	5,9V, 1A
--	----------

Type de pile/accu	Li-Ion
-------------------	--------

Pile	4×1.5 V AA
------	------------

Connexion de la batterie	Insert de batterie
--------------------------	--------------------

Pile temps de chargement	20 h
--------------------------	------

Batterie autonomie - avec rétroéclairage	24 h
--	------

Batterie autonomie - sans rétroéclairage	48 h
--	------

Batterie temps de chargement	8 h
------------------------------	-----

Batterie en option	Batterie en option - interne
--------------------	------------------------------

Conditions environnementales

Température ambiante [Min]	-10 °C
----------------------------	--------

Température ambiante [Max]	40 °C
----------------------------	-------

Humidité atmosphérique [Max]	80 %
------------------------------	------

Température de stockage [Min]	-20 °C
-------------------------------	--------

Température de stockage [Max]	60 °C
-------------------------------	-------

Homologation

Sigle CE	✓
----------	---

Services

Numéro d'article pour étalonnage DAkkS	963-128
--	---------

Numéro d'article pour certificat de conformité	969-517
--	---------

Emballage & expédition

Délais de livraison	1 d
---------------------	-----

Dimensions emballage (L×P×H)	470×470×190 mm
------------------------------	----------------

Mode de livraison	Service de colis
-------------------	------------------

Poids net env.	7 kg
----------------	------

Poids brut env.	8 kg
-----------------	------

Poids d'expédition	8,4 kg
--------------------	--------

Pictogrammes

STANDARD



OPTION



Synthèse de la pré-étude : Relation allométrique entre les dimensions (longueur et largeur) de feuilles de laitue Amaroza et le LAI

Objectif

L'objectif de cette pré-étude est de déterminer une relation allométrique entre les dimensions des feuilles de laitue (longueur \times largeur) et la surface totale de la laitue. En d'autres termes, il s'agit de développer un modèle permettant d'estimer la surface totale d'une laitue à partir de la mesure de la longueur et de la largeur de certaines de ses feuilles.

Dispositif expérimental

Deux types de systèmes de culture ont été étudiés :

- Hydroponie, avec quatre modalités d'ombrage : 0 %, 20 %, 40 % et 60 %.
- Culture en pleine terre sous serre, avec deux modalités d'ombrage : 47,7 % et 56,6 %.

Récolte des données

Pour chacune des modalités d'ombrage, trois laitues ont été échantillonnées.

Sur chaque plante, les paramètres suivants ont été mesurés :

- biomasse fraîche,
- biomasse sèche,
- nombre de feuilles par laitue.

Par ailleurs, la longueur et la largeur de chaque feuille ont été relevées, permettant de calculer une surface théorique de la laitue.

La surface réelle de chaque feuille a également été obtenue par numérisation et analyse d'images à l'aide du logiciel ImageJ.

Analyses statistiques

Plusieurs étapes d'analyses ont été conduites :

1. Étude de l'effet de l'ombrage sur la morphologie foliaire
 - Le paramètre de Montgomery ($M_p = \text{Surf Feuille réelle} / \text{Surf Feuille théorique}$) a été calculé pour chaque feuilles.
 - L'évolution de M_p a été examinée en fonction du taux d'ombrage afin de vérifier si une relation allométrique unique pouvait être établie.
 - Si M_p varie significativement selon l'ombrage, il est nécessaire d'établir une relation spécifique à chaque modalité. Dans le cas contraire, une relation globale est envisageable.
2. Construction de la base de données pour la modélisation
 - L'objectif est de développer un modèle prédictif de la surface totale de la laitue tout en minimisant le nombre de mesures nécessaires.
 - Pour cela, des jeux de données ont été générés de manière virtuelle en ne prenant les mesure que d'une feuille sur 2, une sur 3, ... jusqu'à une feuille sur 9.

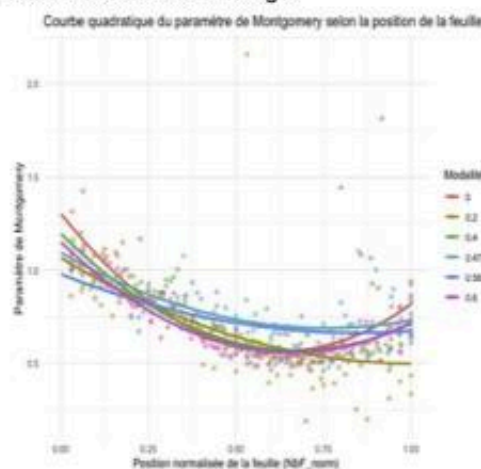
3. Régressions linéaires avec validation croisée (leave-one-out)

- Neuf régressions linéaires ont été établies entre la surface totale réelle (obtenue par numérisation) et la surface théorique estimée selon les différents jeux de données.

Résultats

- Évolution du paramètre de Montgomery

L'analyse montre que M_p varie en fonction du rang foliaire, mais que son évolution est similaire entre les différentes modalités d'ombrage. Cela suggère que l'ombrage n'a pas d'influence significative sur M_p , ce qui permet de considérer une relation allométrique unique valable pour l'ensemble des conditions d'ombrage.



- Régressions linéaires

Les neuf modèles de régression présentent des coefficients de détermination (R^2) élevés, compris entre 0,95 et 0,99. Tous les modèles testés se révèlent donc pertinents pour l'estimation de la surface foliaire totale.

Lot	a	b	R2
Surf_Lot_1	0,729	11,641	0,996
Surf_Lot_2	0,718	6,700	0,994
Surf_Lot_3	0,745	-18,980	0,991
Surf_Lot_4	0,715	62,618	0,988
Surf_Lot_5	0,693	94,054	0,976
Surf_Lot_6	0,686	73,441	0,987
Surf_Lot_7	0,714	37,501	0,976
Surf_Lot_8	0,708	50,244	0,983
Surf_Lot_9	0,726	84,241	0,952

Conclusion

L'ensemble des modèles développés présentent une performance satisfaisante ($R^2 > 0,95$). Toutefois, le modèle basé sur l'échantillonnage d'une feuille sur huit (Surf_Lots_8) apparaît comme le plus avantageux. Il permet en effet d'obtenir une estimation précise de la surface totale en ne mesurant qu'environ 5 à 6 feuilles par laitue, réduisant ainsi significativement le temps nécessaire à la collecte des données.



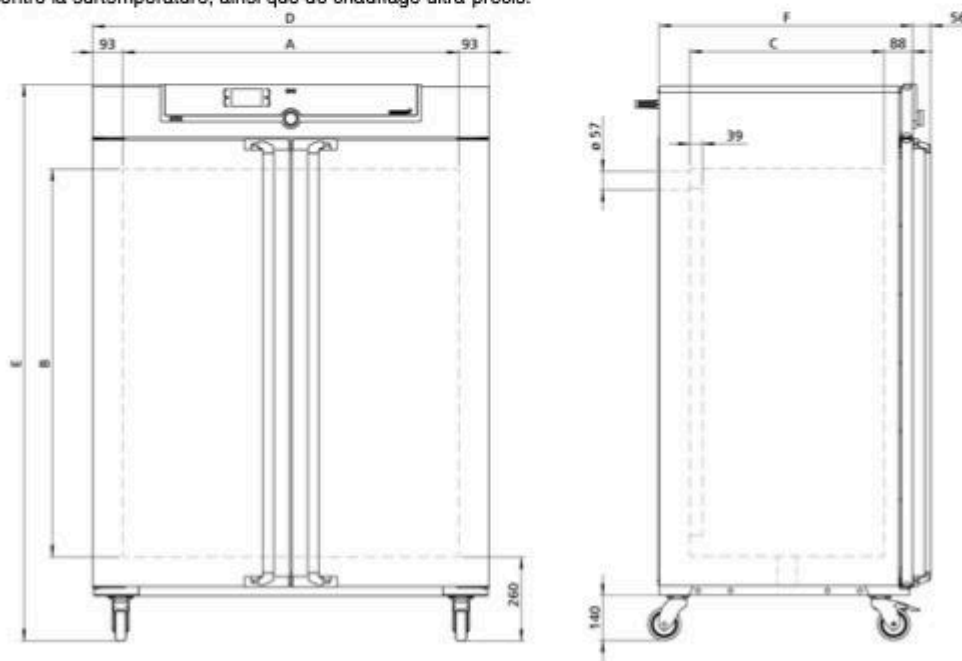
Spécification du produit

UF750

Séchage, chauffage, étuvage, vieillissement, cuisson, test et durcissement de précision dans les domaines de la recherche, de la science, de l'industrie et de l'assurance qualité.



Cette étuve de chauffage et de séchage à réglage universel est le grand classique Memmert en matière de contrôle thermique dans les domaines de la science, de la recherche et des tests de matériaux dans le secteur industriel. Notre chef d'œuvre à la pointe de la technologie, en acier inoxydable de grande qualité, sain et facile à nettoyer répond à toutes les attentes en matière de technologie de ventilation et de régulation, de protection contre la surtempérature, ainsi que de chauffage ultra-précis.



Température

Gamme des températures utiles	au moins 5 (UN/UNplus/UNm/UNmplus) 10 (UF/UFplus/UFm/UFmplus) au-dessus de la temp. ambiante à +300 °C
-------------------------------	--

Résolution d'affichage des valeurs de la température de consigne et de la température réelle

Gamme des températures réglable	+20 jusqu'à +300 °C
---------------------------------	---------------------

Sonde de température	1 thermosonde PT100 DIN de classe A en technologie à 4 brins
----------------------	--

Technique de régulation

ControlCOCKPIT	SingleDISPLAY. Régulateur PID numérique à microprocesseur multifonction adaptatif avec écran couleurs TFT à résolution élevée
----------------	---

Horloge	Minuterie digitale avec programmation de l'heure d'arrêt et réglage de la durée de 1 minute à 99 jours
---------	--

Fonction SetpointWAIT	Démarrage du processus uniquement lorsque la température de consigne est atteinte
-----------------------	---

Étalonnage	Trois valeurs de température au choix
------------	---------------------------------------

Paramètres réglables	Température (Celsius ou Fahrenheit), régime du moteur de brassage d'air, position du clapet d'air, durée des programmes, fuseaux horaires, heures d'été/d'hiver
----------------------	---

Aération

Turbine d'air	Réglage électronique à partir d'incréments de 10 %, fonctionnement silencieux
---------------	---

Air frais	clapet de sortie d'air à commande électronique; diffusion intérieure d'air préchauff
-----------	--

Sortie d'air	Raccord pour sortie d'air avec clapet, réglage électronique
--------------	---

Communication

Enregistrement des états	Enregistrement du cycle du programme en cas de panne d'électricité
--------------------------	--

Programmation	Lecture, gestion et organisation des enregistrements des états du logiciel à partir d'une interface Ethernet (version essai limité dans le temps à télécharger). Clé USB avec logiciel AtmoCONTROL disponible sur demande en tant qu'accessoire.
---------------	--

Sécurité

Dispositif de sécurité thermique	Dispositif électronique de sécurité thermique réglable et limiteur de température mécanique TB de classe de protection 1 (DIN 12880) pour coupure du chauffage à environ 20 °C au-dessus de la température maximale de l'appareil
----------------------------------	---

Système autodiagnostic	Pour la détection des anomalies
------------------------	---------------------------------

Équipement de base

Certificat de calibrage d'usine	calibrage à +160 °C
Porte	Portes en acier inoxydable entièrement isolées avec verrouillage 2 points (fermeture de la porte par compression)
Clayettes	2 grille(s) inox, électropolie(s)

Caisson intérieur en acier inoxydable

Mésures	$L_{(A)} \times H_{(B)} \times P_{(C)}$: 1040 x 1200 x 600 mm (P moins 39mm pour ventilateur)
Intérieur	Facile d'entretien, renforcé par la présence de rainures embouties, chauffage complet des 4 côtés intégré et protégé
Volume	749 l
Nombre max. clayettes	14
Charge maximale de l'appareil:	300 kg
Charge max. par clayette	30 kg

Caisson extérieur en acier inox structuré

Mésures	$L_{(D)} \times H_{(E)} \times P_{(F)}$: 1224 x 1720 x 784 mm (P +56mm hors poignée)
Installation	Sur roulettes à train intégré
Caisson extérieur	Paroi arrière en tôle d'acier entièrement galvanisée

Données électriques

Puissance	Puissance à 400 V et 3 x 230 V s.n., 50/60 Hz environ 7000 W
-----------	--

Conditions d'environnement

Installation	Il convient de prévoir un écart de 15 cm minimum entre le mur et le panneau arrière de l'appareil. L'écart ne doit pas être inférieur à 20 cm avec le plafond et à 5 cm sur les côtés par rapport au mur ou à un autre appareil
Altitude d'installation	max. 2000 m au-dessus du niveau moyen de la mer
Température ambiante	+5 °C à +40 °C
Hygrométrie h.r.	max. 80 %, non condensée
Classe de surtension	II
Niveau de pollution	2

Données sur l'emballage/l'expédition

Information du transport	Les appareils doivent être transportés en position verticale!
Tarif douanier commun	8419 8998
Pays d'origine	Allemagne
Numéro d'enregistrement DEEE	DE 66812464
Dimensions env., carton inclus	Dimensions avec l'emballage (L x H x P): 1330 x 1910 x 1050 mm
Poids net	approximatif: 217 kg
Poids brut sous carton	approximatif: 288 kg

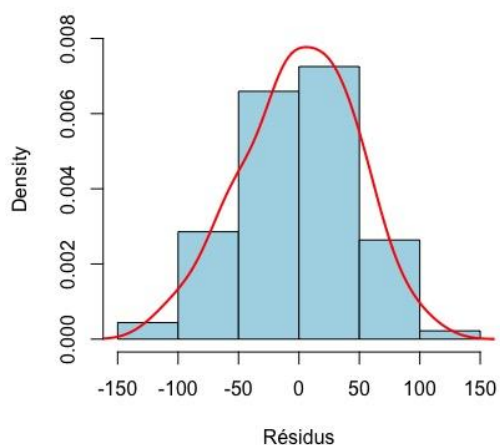
Les unités standards ont reçu l'approbation de sécurité et contiennent les données de test



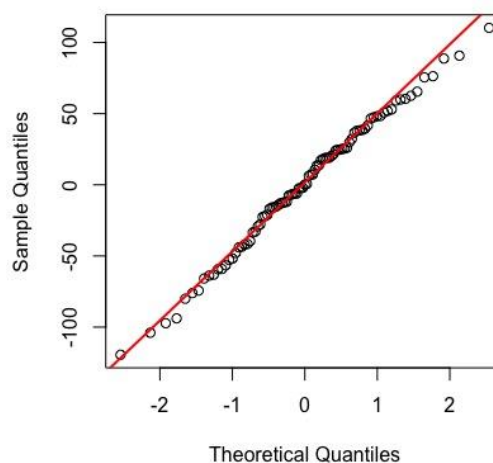
Annexe 16 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_Bf.

Teste	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,866	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,0826	Homogénéité des variances

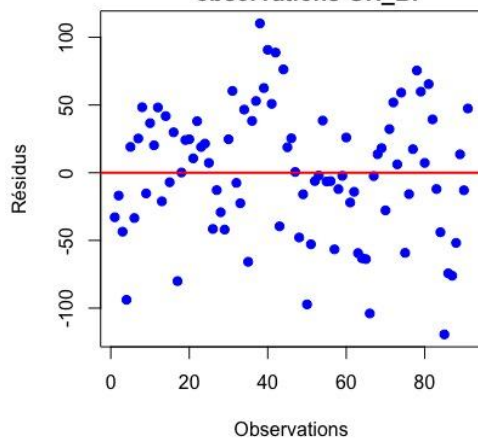
Distribution de résidus de GH_Bf



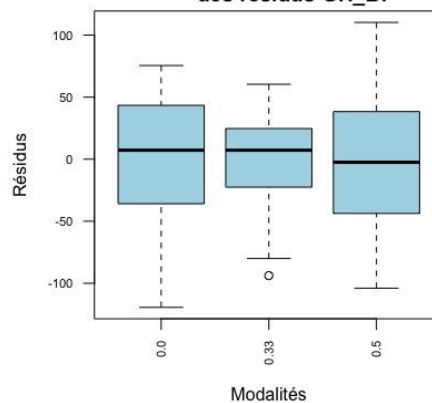
QQ-Plot de GH_Bf



Résidus en fonction des observations GH_Bf

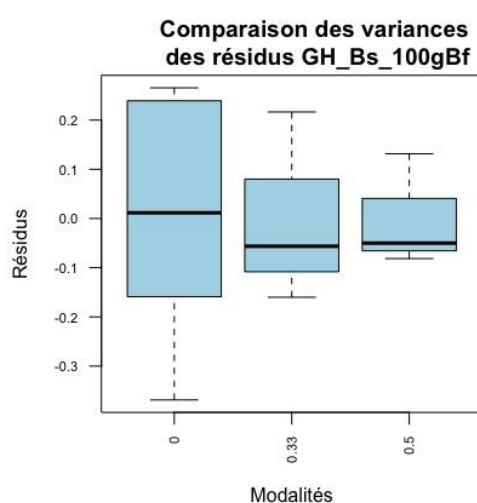
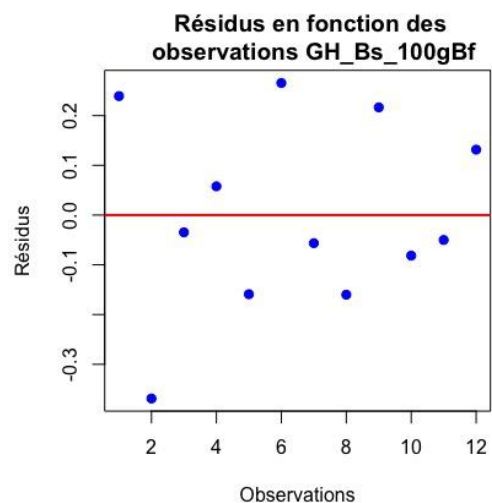
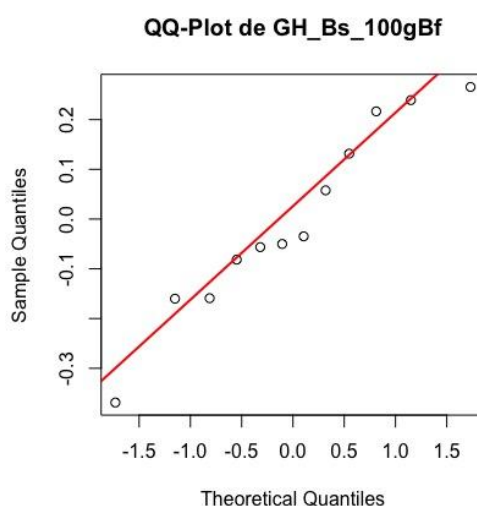
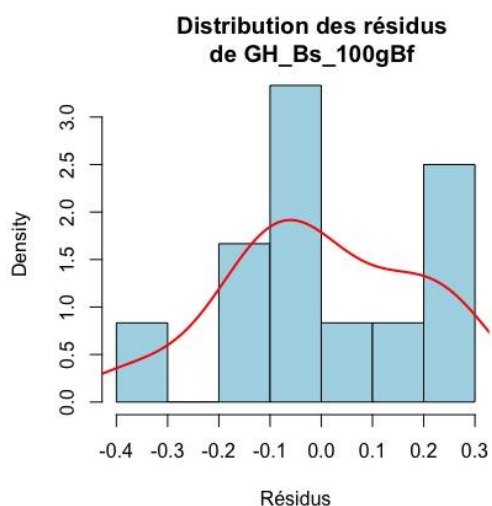


Comparaison des variances des résidus GH_Bf



Annexe 17 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_%Bs.

Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,6311	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,5877	Homogénéité des variances

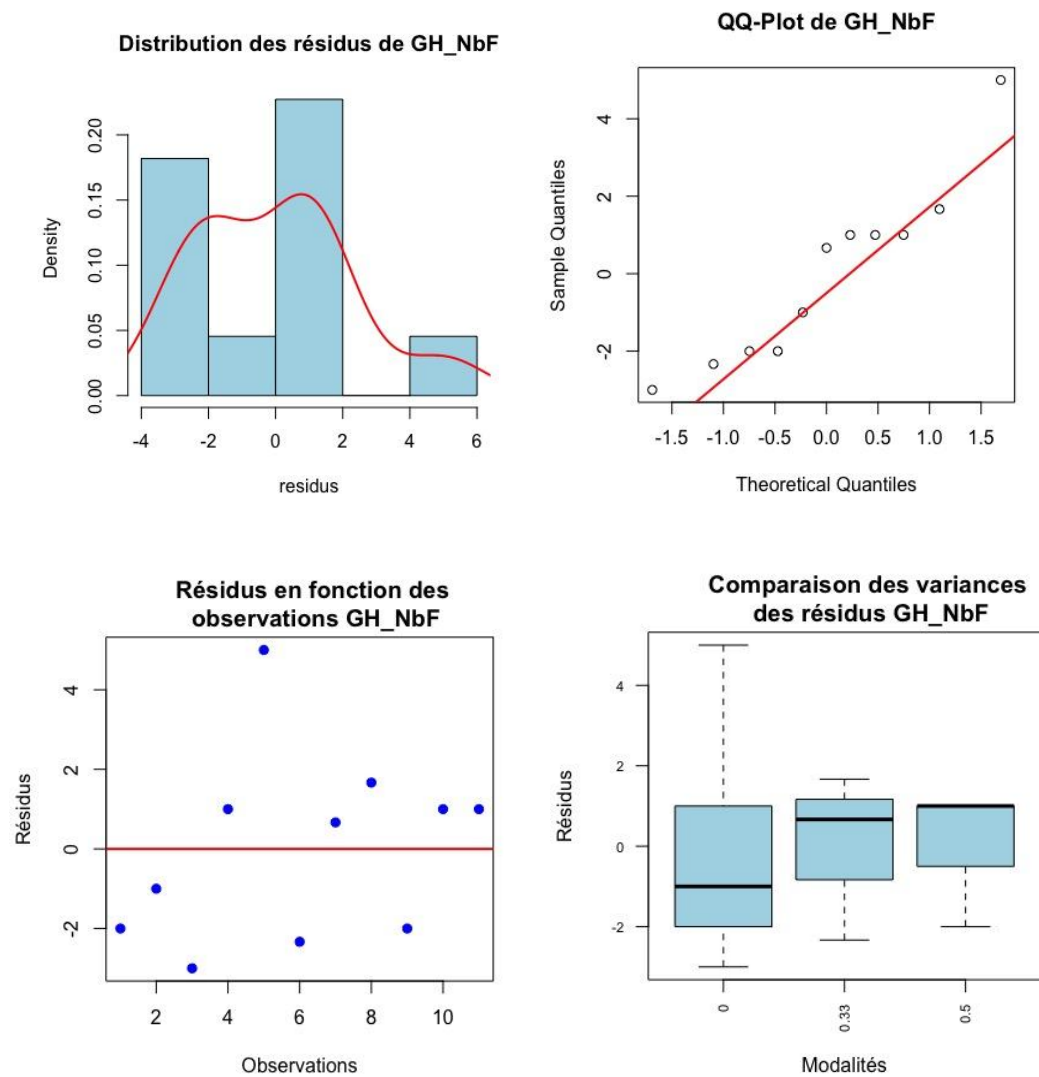


Annexe 18 : Tableau des moyennes de biomasse fraîche (Bf), de pourcentage de biomasse sèche (%Bs), de nombre de feuilles (NbF) et d'indice de surface foliaire (LAI), avec leur intervalle de confiance à 95 %, pour chaque modalité de couverture de panneaux solaires (0 %, 33 % et 50 %) dans la serre GH_PV.

	0 %	33 %	50 %
Bf (g/plant)	438 ± 39 ^b	511 ± 34 ^a	414 ± 32 ^b
%Bs (%)	4,37 ± 0,38 ^a	3,61 ± 0,54 ^b	3,75 ± 0,55 ^b
NbF (feuilles/plant)	39,0 ± 4,5 ^a	38,3 ± 6,9 ^a	37,0 ± 6,5 ^a
LAI (-)	7,54 ± 0,99 ^b	8,81 ± 1,28 ^a	7,92 ± 1,29 ^{ab}

Annexe 19 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_NbF.

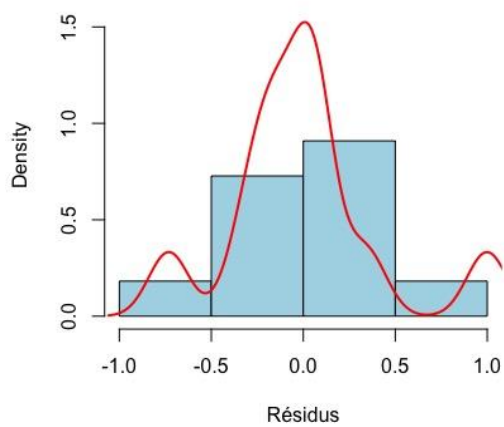
Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,244	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,647	Homogénéité des variances



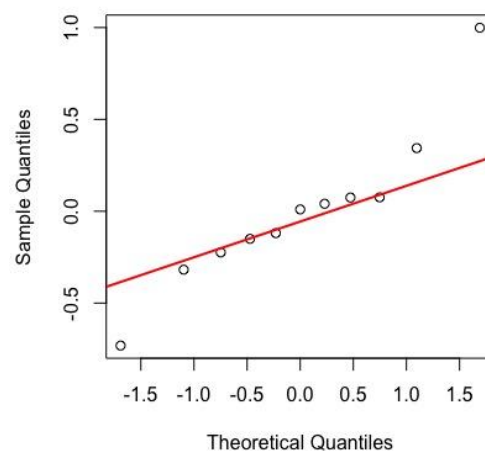
Annexe 20 : Conditions d'application de l'ANOVA GH_LAI.

Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,256	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,131	Homogénéité des variances

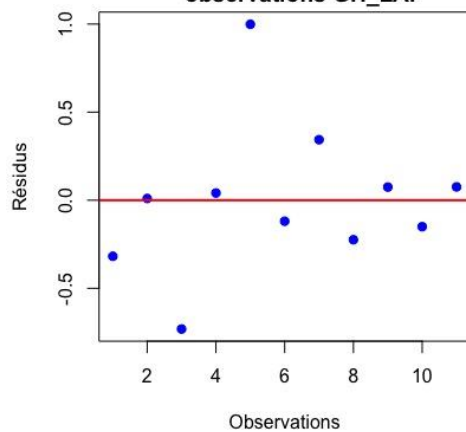
Distribution des résidus de GH_LAI



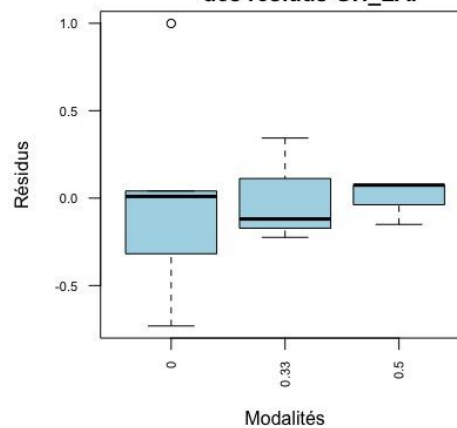
QQ-Plot de GH_LAI



Résidus en fonction des observations GH_LAI

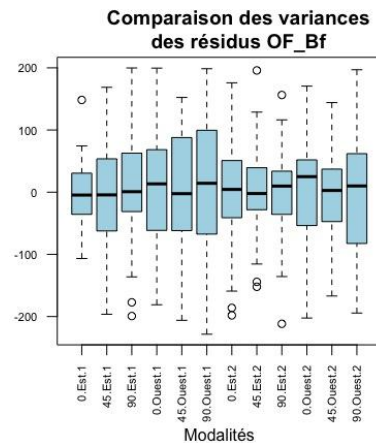
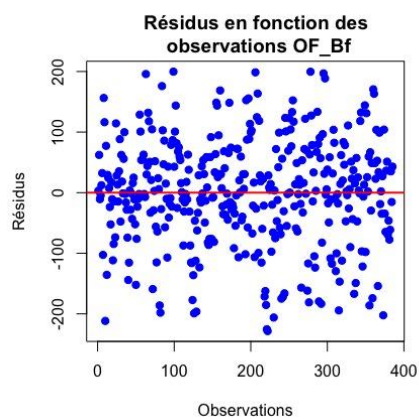
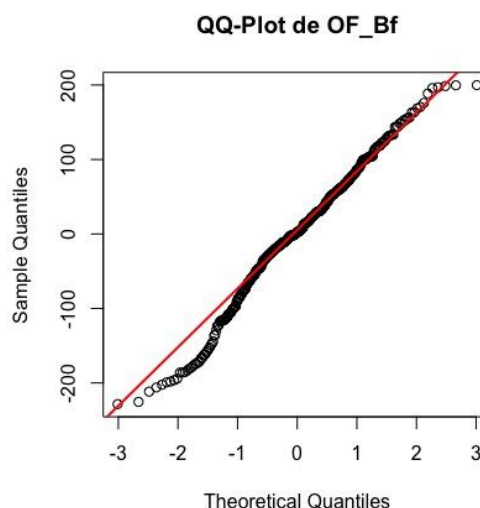
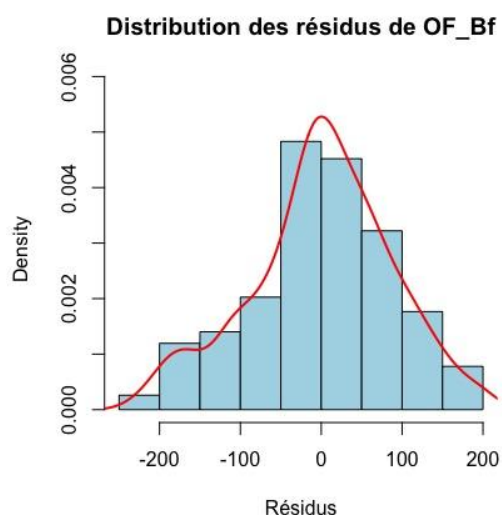


Comparaison des variances des résidus GH_LAI



Annexe 21 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_Bf.

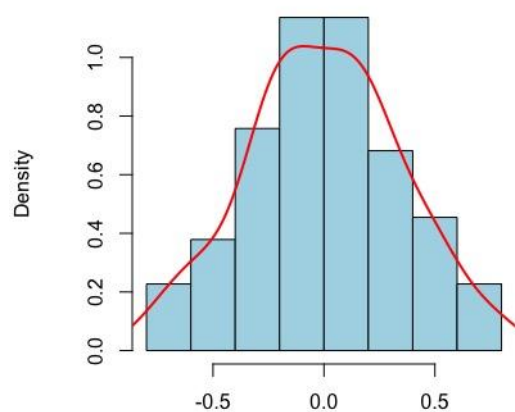
Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,00180	Les résidus ne suivent pas une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,0261	Homogénéité des variances n'est pas vérifié



Annexe 22 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_%Bs.

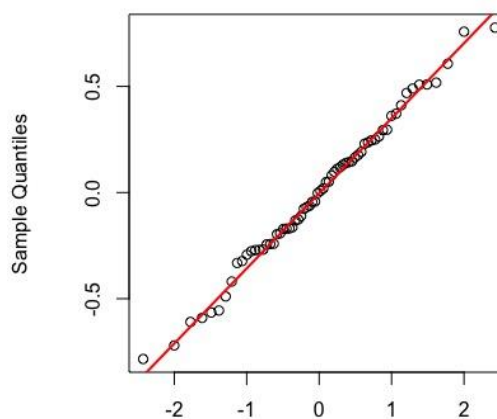
Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,9097	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,815	Homogénéité des variances

**Distribution des résidus
de OF_Bs_100gBf**



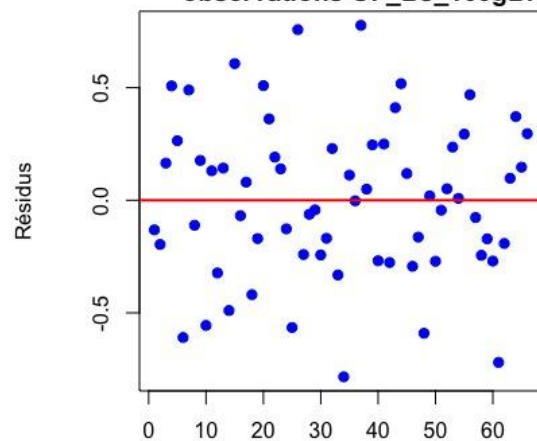
Résidus

QQ-Plot de OF_Bs_100gBf



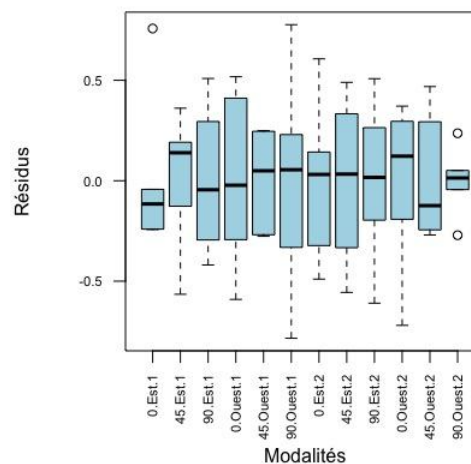
Theoretical Quantiles

**Résidus en fonction des
observations OF_Bs_100gBf**



Observations

**Comparaison des variances
des résidus OF_Bs_100gBf**

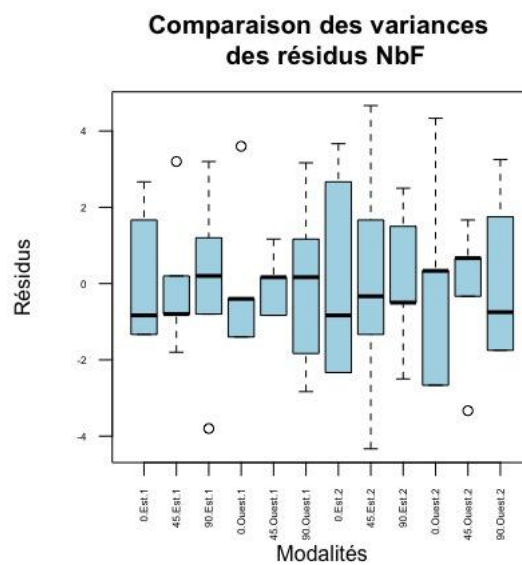
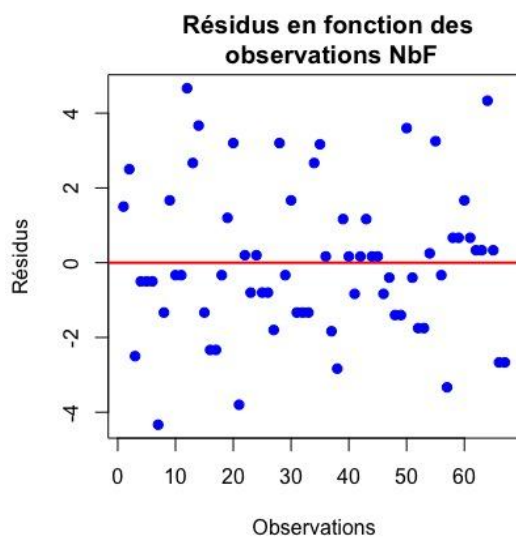
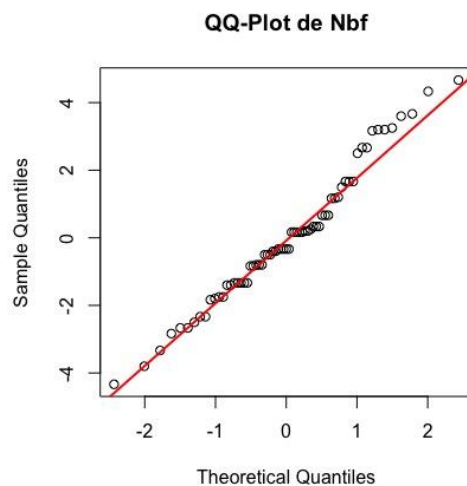
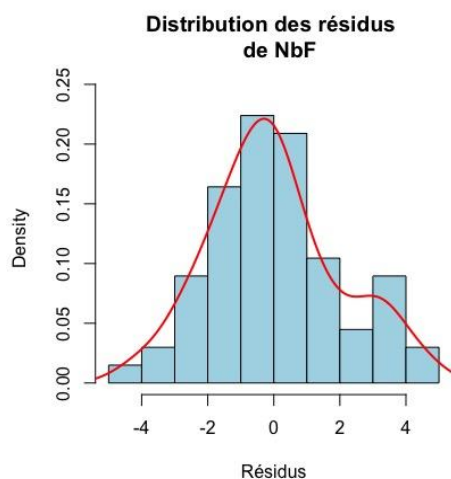


Annexe 23 : Tableau des moyennes de biomasse fraîche (Bf), pourcentage de biomasse sèche (%Bs), nombre de feuilles (NbF) et indice de surface foliaire (LAI), avec leur intervalle de confiance à 95 %, pour chaque modalité du dispositif de culture en extérieur avec panneaux photovoltaïques (OF_PV).

Modalité	Bf	%Bs	NbF	LAI
OF	404 ± 101	4,44 ± 0,71	45 ± 4,6	7,64 ± 1,84
OF_0E1	420 ± 63	4,47 ± 0,71	38 ± 3,7	6,70 ± 1,84
OF_0E2	293 ± 62	5,92 ± 0,71	39 ± 3,7	5,59 ± 1,68
OF_0W1	544 ± 63	3,88 ± 0,71	43 ± 4	8,45 ± 1,68
OF_0W2	386 ± 64	4,25 ± 0,72	39 ± 3,7	5,80 ± 1,84
OF_45E1	351 ± 62	5,45 ± 0,78	36 ± 4,0	5,69 ± 1,84
OF_45E2	319 ± 65	5,63 ± 0,87	40 ± 3,7	5,77 ± 2,06
OF_45W1	559 ± 64	4,16 ± 0,78	44 ± 3,7	7,07 ± 1,84
OF_45W2	410 ± 66	4,30 ± 0,71	38 ± 3,7	6,18 ± 1,66
OF_90E1	326 ± 63	5,75 ± 0,87	40 ± 4,0	5,70 ± 2,06
OF_90E2	342 ± 64	5,70 ± 0,71	38 ± 3,8	5,44 ± 1,68
OF_90W1	451 ± 63	4,53 ± 0,72	41 ± 3,7	6,87 ± 1,68
OF_90W2	383 ± 62	4,61 ± 0,71	43 ± 4,5	6,13 ± 1,68

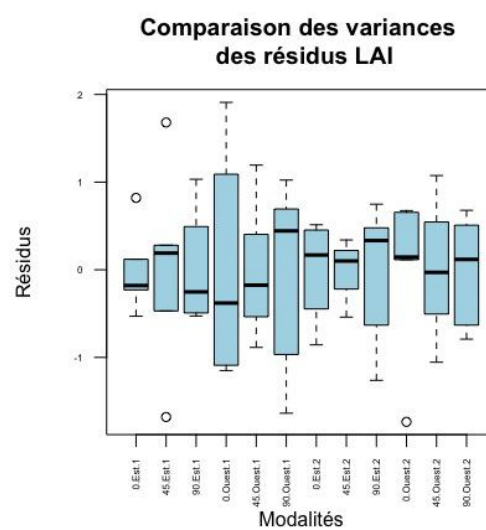
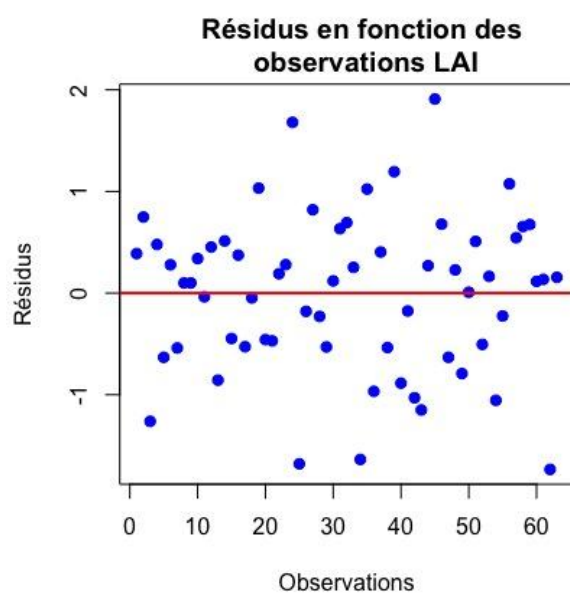
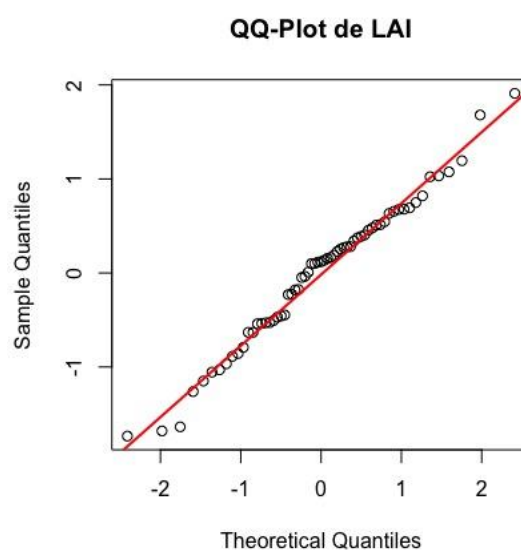
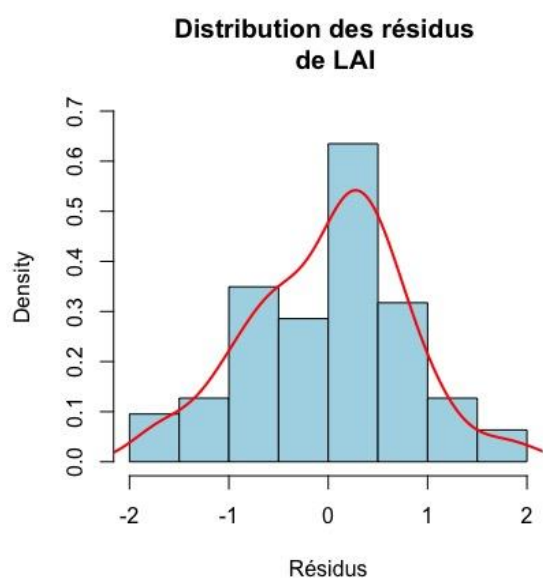
Annexe 24 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour NbF.

Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,2182	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0,6108	Homogénéité des variances



Annexe 25 : Conditions d'application des ANOVA1 et ANOVA3 pour OF_LAI.

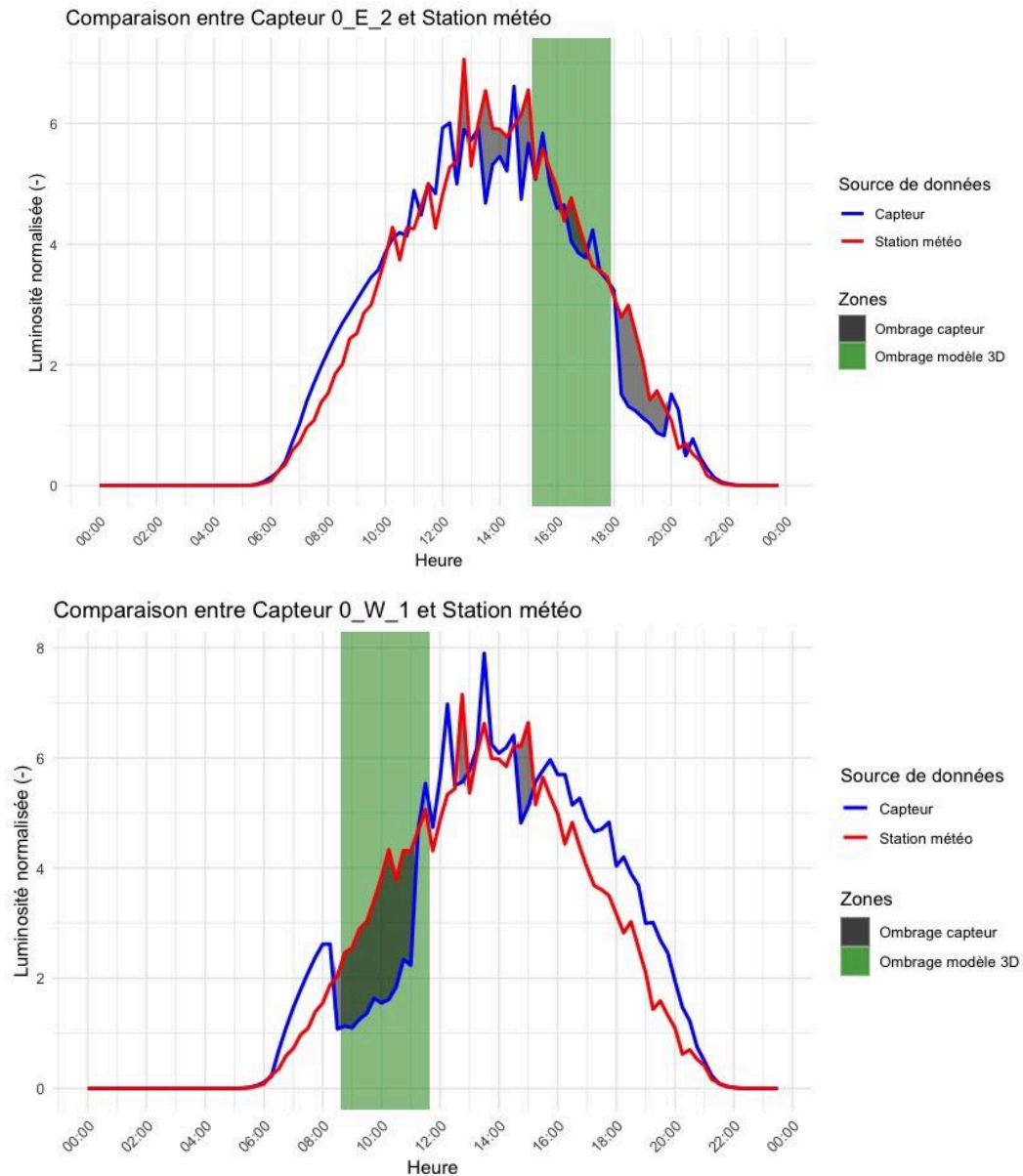
Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0.5736	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0.5236	Homogénéité des variances

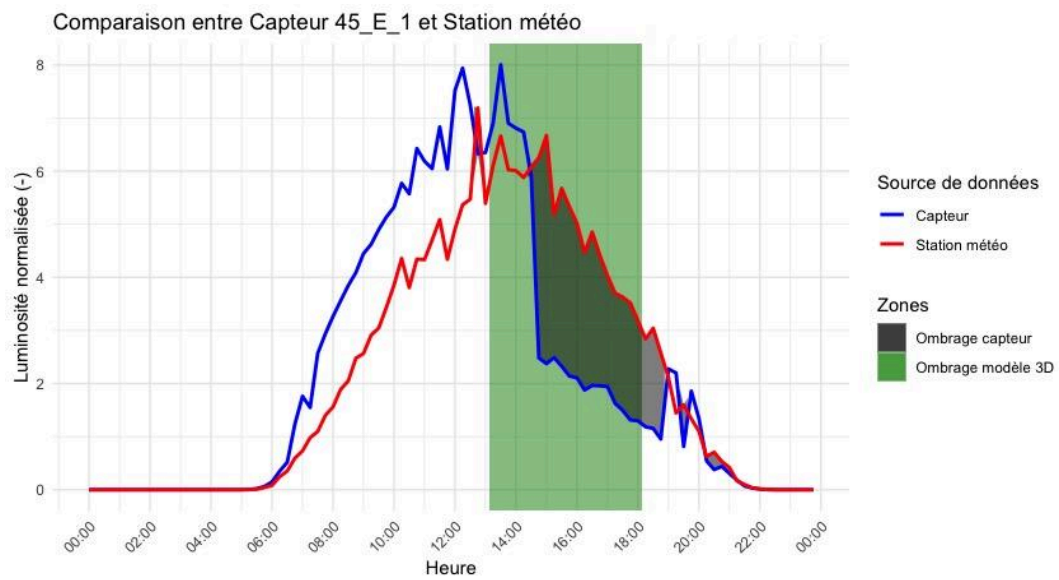
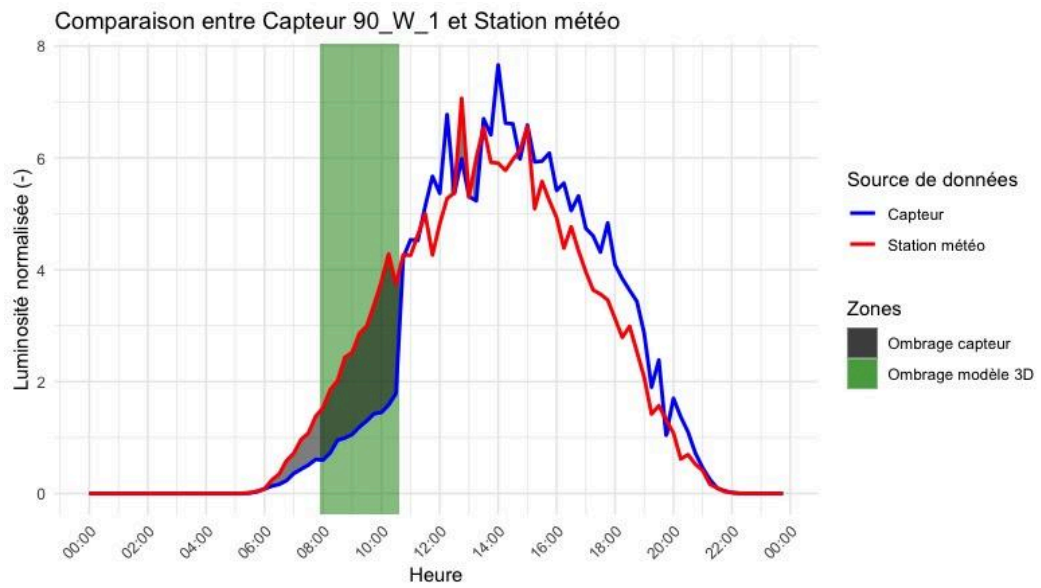


Annexe 26 : Valeurs explicatives en pourcentage des dimensions de l'ACP.

Dimension	Valeur explicative (%)	Somme des valeurs explicatives (%)
Dim1	73,432	73,432
Dim2	17,337	90,769
Dim3	5,846	96,614
Dim4	3,386	100,000

Annexe 27 : Comparaison de la luminosité normalisée mesurée par les capteurs de la plateforme WASABI (courbe bleue) et celle fournie par la station météo (courbe rouge) au cours de la journée. La zone verte représente la période d'ombrage estimée par le modèle 3D, tandis que la zone grise correspond à l'ombrage effectivement détecté par les capteurs.





Annexe 28 : Valeurs chiffrées du pourcentage d'ombrage et du DLI (Daily Light Integral) pour chaque modalité de cette étude.

Modalité	Pourcentage ombrage (%)	DLI ($\text{mol.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$)
GH	18,00	13,311
GH_33	47,70	8,490
GH_50	56,60	7,045
OF	0	16,901
OF_0E1	9,74	15,255
OF_0E2	6,78	15,755
OF_0W1	7,31	15,666
OF_0W2	4,38	16,161
OF_45E1	12,10	14,856
OF_45E2	10,35	15,152
OF_45W1	1,42	16,661
OF_45W2	1,70	16,614
OF_90E1	9,66	15,268
OF_90E2	9,29	15,331
OF_90W1	6,58	15,789
OF_90W2	6,98	15,721

Annexe 29 : Analyse de sols.



C.A.R.A.H. asbl
CCB : BE-63 1983 7489 3167
N° : 412.404.111

Données pédologiques

Données pédologiques				
Type de sol :	C.E.C. mesurée (6)		Taux saturation	% argile (6)
limoneux moyen à lourd	11	meq/100g	sursaturé en bases	16%

Résultats de l'analyse - interprétation pour la culture :

Gbx_1

		Trop acide	Acide	Léger. acide	Normal	Léger. basique	Basique	Trop basique	pH souhaitable
pH KCl ¹	6.6								6 à 6,5
pH eau mesuré	7.3								
Teneur du sol		Trop faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Teneur élevée	Trop excessive	Teneur souhaitable
Carbone (%C) ²¹	3.2								1,1 à 1,2
Humus calculé (%)	6.4								2,2 à 2,4
Azote org. (% N) ²⁴	2.4								1,2 à 1,6
Rapport C/N	13.3	Minéralisation ralentie							8 à 12

Macro-éléments		Trop faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Excès léger	Trop excessive	Teneur souhaitable
Phosphore (mg P/100g) ⁴	18.5								4,9 à 6,4
Potassium (mg K/100g) ⁴	102.5								12,9 à 17,2
Magnésium (mg Mg/100g) ⁴	31.8								8 à 10,7
Calcium (mg Ca/100g) ⁴	355								150 à 224
Sodium (mg Na/100g) ⁴	3.2								2,5 à 3,5



C.A.R.A.H. asbl
CCB : BE-63 1983 7489 3167
N° : 412.404.111

Données pédologiques

Données pédologiques				
Type de sol :	C.E.C. mesurée (6)		Taux saturation	% argile (6)
limoneux moyen à lourd	11	meq/100g	sursaturé en bases	17%

Résultats de l'analyse - interprétation pour la culture :

Gbx_2

		Trop acide	Acide	Léger. acide	Normal	Léger. basique	Basique	Trop basique	pH souhaitable
pH KCl ¹	6.9								6,1 à 6,6
pH eau mesuré	7.5								
Teneur du sol		Trop faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Teneur élevée	Trop excessive	Teneur souhaitable
Carbone (%C) ²¹	3.7								1,1 à 1,2
Humus calculé (%)	7.4								2,2 à 2,4
Azote org. (% N) ²⁴	2.6								1,2 à 1,6
Rapport C/N	14.2	Minéralisation lente							8 à 12

Macro-éléments		Trop faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Excès léger	Trop excessive	Teneur souhaitable
Phosphore (mg P/100g) ⁴	16.1								4,7 à 6,1
Potassium (mg K/100g) ⁴	86.2								12,9 à 17,2
Magnésium (mg Mg/100g) ⁴	33.0								8 à 10,7
Calcium (mg Ca/100g) ⁴	370								150 à 224
Sodium (mg Na/100g) ⁴	5.5								2,5 à 3,5



C.A.R.A.H. asbl

CCB : BE-63 1983 7489 3167

tva : 412.404.111

Données pédologiques

Type de sol :	C.E.C. mesurée (6)	Taux saturation	% argile (6)
sablo-limoneux	9 meq/100g	sursaturé en bases	12%

Résultats de l'analyse - interprétation pour la culture :

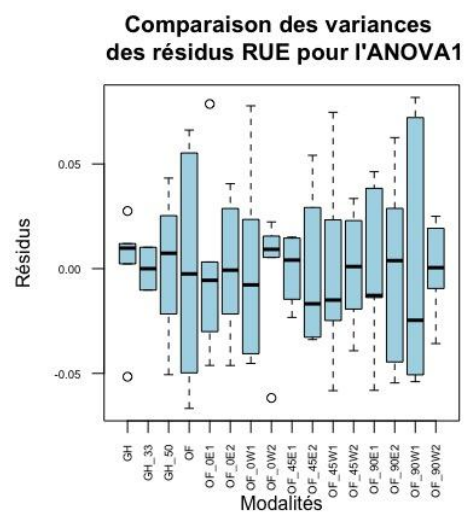
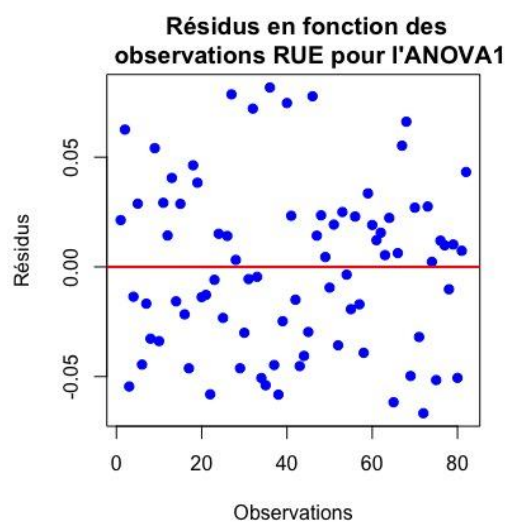
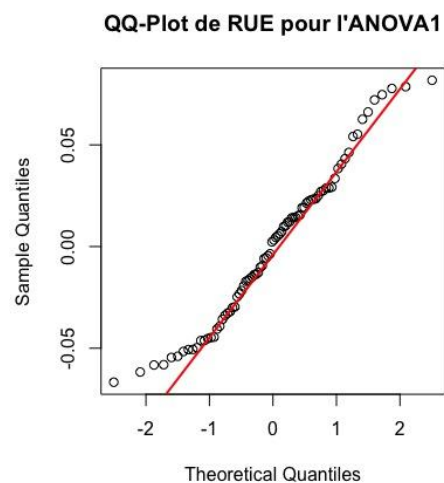
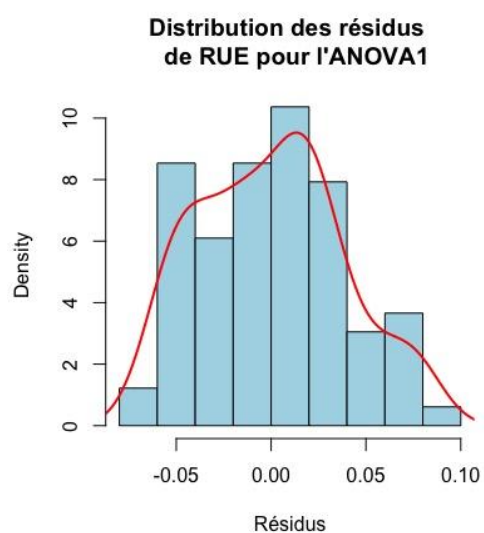
Gbx_3

		Très acide	Acide	Léger. acide	Normal	Léger. basique	Basique	Très basique	pH souhaitable
pH KCl ¹	6.3								5,7 à 6,2
pH eau mesuré	7.0								
Teneur du sol		Très faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Teneur élevée	Teneur excessive	Teneur souhaitable
Carbone (%C) ^{2b}	3.7								1,1 à 1,3
Humus calculé (%)	7.4								2,2 à 2,5
Azote org. (% N) ^{2a}	2.7								1,2 à 1,6
Rapport C/N	13.7	Minéralisation ralentie							8 à 12

Macro-éléments		Très faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Excès léger	Teneur excessive	Teneur souhaitable
Phosphore (mg P/100g) ⁴	11.5								5,3 à 6,9
Potassium (mg K/100g) ⁴	88.2								10,6 à 14,1
Magnésium (mg Mg/100g) ⁴	26.4								6,6 à 8,7
Calcium (mg Ca/100g) ⁴	270								122 à 184
Sodium (mg Na/100g) ⁴	3.0								2,4 à 3,4

Annexe 30 : Conditions d'application de l'ANOVA RUE.

Test	P valeur	Conclusion
Shapiro-Wilk normality test	0,05564	Les résidus suivent une loi normale
Bartlett test of homogeneity of variances	0.646	Homogénéité des variances



Annexe 31 : Photo aérienne du dispositif OF_PV.

On peut observer que, pour les trois panneaux photovoltaïques OF_90 (position horizontale) situés à droite sur la photo, il y a une accumulation de saleté sur les panneaux.

