HAL open science

# Évaluation de l'influence d'un système de serre autonome sur une culture de tomates et développement d'outils de modélisation de surface foliaire et de transpiration

Paul Herment

▶ To cite this version:

Paul Herment. Évaluation de l'influence d'un système de serre autonome sur une culture de tomates et développement d'outils de modélisation de surface foliaire et de transpiration. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03436138

HAL Id: dumas-03436138

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03436138

Submitted on 19 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**AGROCAMPUS OUEST**

☑ **CFR Angers** ☐ **CFR Rennes**

| | |
|---|---|
| Année universitaire : 2020-2021<br>Spécialité :<br>Ingénieur en Horticulture<br>Spécialisation (et option éventuelle) :<br>Ingénierie des productions et des produits de l'horticulture | **Mémoire de fin d'études**<br>☒ d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)<br>☐ de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)<br>☐ de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)<br>☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2) |

# Évaluation de l'influence d'un système de serre autonome sur une culture de tomates et développement d'outils de modélisation de surface foliaire et de transpiration

Par : Paul HERMENT

***Soutenu à Angers le 16 septembre 2021***

***Devant le jury composé de :***

Président : Etienne Chantoiseau

Maître de stage : François Habasque

Enseignant référent : Mathilde Briard

Autres membres du jury : Gerhard Buck Sorlin, Juré

Landry Rossdeutsch, Juré

Sylvain Grimault, Maître d'apprentissage

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans les personnes qui m'ont donné l'opportunité de m'épanouir autant sur le plan professionnel et personnel durant les derniers moments de ma vie étudiante. Je tenais à les remercier ici.

Tout d'abord, je remercie Antoine Lepilleur, Sylvain Grimault et Barthélémy Richel, pour m'avoir amené à concrétiser ma mission de fin d'études à l'étranger, dans une entreprise référente de l'industrie horticole. Merci à eux, mais également à François Habasque et à Thierry Legros pour m'avoir accueilli avec autant d'intérêt et de confiance sur l'un des sites de production de Red Sun Farms®. Merci à vous tous de m'avoir permis d'aborder des thématiques aussi passionnantes et captivantes, qui ont su me maintenir en éveil durant tout un été et qui continuent de m'animer encore aujourd'hui. Merci également à Mathilde Briard, de m'avoir accompagné durant tout cet été avec un suivi aussi professionnel que sympathique.

Mais ce sont aussi les gens qui me sont proches, cheminant avec moi dans l'intimé, qui m'ont poussé à aller plus loin, jusqu'à la remise symbolique de mon mémoire de fin d'études d'ingénieur, marquant le terme du parcours sinueux de mes études supérieures. Alors merci à Alice, bien entendu, qui a toujours su m'aider à retrouver l'énergie et la motivation dans les moments difficiles, et à maintenir ma détermination et mon entrain dans les moments positifs. Merci à toi, pour ta bienveillance et ta dévotion. Merci aussi à mon ami le plus proche, Pierre-Yves, pour m'avoir permis de réviser l'humour qui nous définit tant, malgré les 10 000 kilomètres qui nous séparaient durant cet ultime période. Merci à Yan également, qui a toujours su m'apporter une aide utile, aussi bien sur des aspects de modélisation de surface foliaire que sur des idées d'aménagement de camping-car. Merci à Antonin, de stimuler ma volonté de découvrir l'ailleurs par sa soif d'explorer le monde et sa nature infinie. Merci à Philippine pour sa créativité et sa joie débordante. Et merci à tous ceux avec qui j'ai pu passer le plus clair de mon temps cette année : la spécialité I2PH et tous les cas sociaux qui la composent, Nicolas Le Cras le pizzaïolo fou, merci à Yassine pour tes courses en vélos nocturnes, merci à Louise pour nous avoir materné durant tout le projet fil rouge, à Ashraf pour produire les meilleurs kebabs du monde, à Emilio et Jordan, pour m'avoir partagé les joies de la bandera et la beauté d'Ixtapa.

Mes derniers remerciements, je veux pour finir les adresser à ma famille. J'aimerai que mes parents sachent à quel point leur éducation et leur ouverture d'esprit a pu me permettre de persévérer, de continuer à croire et de repousser mes doutes jusqu'à maintenant. Sans ce soutien permanent et inaltérable, je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui. Tout l'amour que porte ma famille pour chacun de ceux qui y évoluent, n'a été qu'un moteur de fond supplémentaire ayant favorisé mes accomplissements professionnels et personnels. Merci à mes grands-mères et à mon grand-père pour me prouver chaque jour que l'on peut rester jeunes bien au-delà des rides, merci à mes frères, pour avoir enrichi ma culture et mon regard sur le monde par leur plus grande expérience, merci à ma cousine et à mon cousin, de continuer à me montrer que c'est la curiosité qui est à l'origine de l'épanouissement et merci à mon grand cousin Samuel, de toujours me garder un peu de bon café malgré mes visites de moins en moins régulières. Merci à vous d'avoir participé à l'élaboration de ce document que vous vous apprêtez sûrement à lire.

## GLOSSAIRE

Capteur de flux de sève : Un capteur de flux de sève permet la mesure du débit de sève d'une plante via la mesure d'une différence de température en amont et en aval d'un point de chauffe.

Différentiel de température : Le différentiel de température est la différence entre les températures de nuit et les températures de jour. Si les températures de jours sont plus élevées que les températures de nuit ce différentiel sera faible et vice-versa.

DPV : Le déficit pression vapeur (kPa) exprime la différence entre l'eau contenu dans l'atmosphère et la quantité maximale qu'elle serait capable de contenir. Plus il est élevé, plus la pression exercée sur les stomates sera forte et augmentera la transpiration des plantes jusqu'à un certain seuil.

Grower : Ce terme anglais est couramment utilisé par la profession pour faire référence à un chef de culture.

LAI : L'indice de surface foliaire ($m^2.m^{-2}$), de l'anglais *Leaf Area Index*, représente la surface d'une entité végétale occupant une unité de surface de production.

Lixiviation : La lixiviation est la percolation lente de matière solide et d'éléments du sol ou d'un substrat dans ses couches profondes ou en dehors de ce dernier.

Lysimètre : Un lysimètre est un appareil permettant la mesure de la consommation en eau des plantes en mesurant leur masse en continu ou en évaluant la différence entre l'eau apportée et le drainage d'une micro-parcelle.

$R^2$ : Le coefficient de détermination mesure la qualité de prédiction de la régression linéaire d'une variable explicative.

RLA : La surface foliaire relative, de l'anglais *Relative Leaf Area*, est le ratio de la surface foliaire d'une feuille et de la surface foliaire moyenne d'une plante. Plus il est proche de un, plus la feuille étudiée est proche de la moyenne.

RLH : La hauteur de feuille relative, de l'anglais *Relative Leaf Height*, est le rapport entre le nœud d'insertion d'une feuille et la hauteur de sa plante hôte. Il permet l'attribution d'une hauteur en pourcentage à cette feuille.

RRMSE : La racine de l'erreur quadratique moyenne relative, de l'anglais *Relative Root Mean Square Error*, mesure les écarts d'une variable de prédiction avec une variable réelle.

Système de régulation climatique : Un système de régulation climatique est un système permettant de fixer des consignes d'arrosage, de chauffage, de refroidissement, d'aération, de ventilation, d'ombrage ou d'occultation qui permettront le pilotage d'équipements notamment en serre.

WUE : L'efficience de l'utilisation de l'eau, de l'anglais *Water Use Efficiency*, traduit normalement le rapport entre l'eau utilisé par les plantes et l'eau perdu par transpiration. Il fait ici référence au rapport entre la consommation en eau des plantes et leur rendement ($kg.l^{-1}$).

**TABLE DES MATIERES**

1 Introduction ..... 1

2 Contexte de l'étude ..... 2

2.1 La technologie et l'automatisation des serres ..... 2

2.2 La transpiration comme indicateur de performances agronomiques ..... 5

3 Modélisation de l'indice de surface foliaire et analyse de ses caractéristiques sous une régulation autonome ..... 8

3.1 Introduction ..... 8

3.2 Matériel et méthodes ..... 9

3.2.1 Zone d'étude ..... 9

3.2.2 Dispositif expérimental ..... 11

3.2.3 Méthodes ..... 12

3.3 Résultats et discussion ..... 16

3.3.1 Influence du facteur de régulation climatique sur la surface foliaire ..... 16

3.3.2 Modélisation de l'indice de surface foliaire ..... 18

3.4 Conclusion ..... 21

4 Analyse de l'influence du système autonome sur la consommation en eau et la productivité, et modélisation de la transpiration ..... 22

4.1 Introduction ..... 22

4.2 Matériel et méthodes ..... 24

4.2.1 Zone d'étude ..... 24

4.2.2 Dispositif expérimental ..... 25

4.2.3 Méthodes ..... 26

4.3 Résultats et discussion ..... 30

4.3.1 Influence du facteur de régulation climatique sur la consommation en eau et la production ..... 30

4.3.2 Modélisation de la transpiration ..... 35

4.4 Conclusion ..... 38

5 Conclusion générale et ouverture ..... 39

Bibliographie ..... 41

Annexes ..... 46

Annexe 1 : Evolution du déficit pression vapeur journalier en période de jour et de nuits pour les deux modalités de régulation climatique durant la periode de la deuxième expérimentation ..... 47

Annexe 2 : Evolution de l'hygrométrie journaliere en période de jour et de nuits pour les deux modalités de régulation climatique durant la periode de la deuxième expérimentation ..... 48

Annexe 3 : Evolution des consignes des ouvrants d'aération horaire pour les deux modalités de régulation climatique durant les deux dernières semaines de la deuxième de l'expérimentation ..... 49

Annexe 4 : Définition des paramètres des deux modèles de transpiration étudiés ..... 50

Modèle 1 ..... 50

Modèle 2 ..... 50

Annexe 5 : Présentation des paramètres modifiés après calibration des modèles ..... 57

**TABLE DES FIGURES**

Figure 1 : Taux d'évolution annuel du nombre d'articles parus sur le sujet des technologies sous serre et de l'agriculture sur la base documentaire Elsevier Scopus de 1999 à 2018. [source (Aznar-Sánchez et al. 2020)]..... 3

Figure 2 : Plan de la zone d'étude de l'indice de surface foliaire. [Source personnelle]..... 10

Figure 3 : Valeurs des indices de surface foliaire mesurés sur les 10 plantes prélevées dans chaque compartiment. [Source personnelle]..... 16

Figure 4 : Répartitions des valeurs de LAI autour de la médiane de chaque compartiment. [Source personnelle] ..... 16

Figure 5 : Valeurs des indices de surface foliaire des plantes du compartiment de référence réparties dans un ordre chronologique du premier jour (J1) jusqu'à la fin des notations de ce compartiment (J5). [Source personnelle] ..... 17

Figure 6 : Relation puissance rencontrée entre la surface rectangulaire et la surface réelle de l'ensemble des feuilles prélevées durant l'expérimentation. [Source personnelle]..... 18

Figure 7 : Écarts moyens relatifs entre les surfaces foliaires des feuilles portant le même numéro pour l'ensemble des plantes des deux compartiments. [Source personnelle]..... 18

Figure 8 : Relation entre la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel dans le compartiment de référence. [Source personnelle]..... 20

Figure 9 : Relation entre la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel dans le compartiment autonome. [Source personnelle]..... 20

Figure 10 : Relation entre la régression linéaire multiple de la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel pour l'ensemble des plantes étudiées. [Source personnelle]..... 21

Figure 11 : Plan de la zone d'étude de la consommation en eau. [Source personnelle] ..... 24

Figure 12 : Table mobile d'analyse de qualité des fruits et de rendement. [Source personnelle]..... 26

Figure 13 : Installation des lysimètres de drainage supportant deux pains de culture de six plantes chacun. [Source personnelle]..... 26

Figure 14 : Volume de consommation cumulé en litres par mètre carré durant la période d'expérimentation entre le compartiment de référence (moyenne des lysimètres R1 et R2) et le compartiment autonome (moyenne des lysimètres A1 et A2). [Source personnelle]..... 30

Figure 15 : Volume de drainage cumulé en litres par mètre carré durant la période d'expérimentation entre le compartiment de référence (moyenne des lysimètres R1 et R2) et le compartiment autonome (moyenne des lysimètres A1 et A2). [Source personnelle]..... 30

Figure 16 : Évolution du degré Brix moyen observé durant quatre des semaines de l'expérimentation sur l'ensemble des lysimètres. Les valeurs indiquées ici sont obtenues en

faisant la moyenne des premiers fruits de tous les bouquets récoltés sur les plantes des lysimètres en une semaine. [Source personnelle] ..... 32

Figure 17 : Rendement cumulé en kilogrammes de fruits frais du compartiment de référence et du compartiment autonome depuis l'activation du système autonome. [Source personnelle]..... 33

Figure 18 : Efficience de l'utilisation de la ressource en eau sur le rendement (WUE) cumulée en kilogrammes produits par litre du compartiment de référence et du compartiment autonome depuis le début de la disponibilité des données liées au volume d'eau apporté, trois semaines après l'activation du système autonome. [Source personnelle]..... 33

Figure 19 : Évolution des températures nocturnes et diurnes journalières moyennes du compartiment de référence et du compartiment autonome sur la période d'expérimentation. [Source personnelle] ..... 34

Figure 20 : Relation linéaire entre les estimations de transpiration du modèle 1 faites à partir des plantes et des données relatives au lysimètre R2 et la consommation en eau réelle de ce dernier. [Source personnelle] ..... 37

Figure 21 : Relation linéaire entre les estimations de transpiration du modèle 2 faites à partir des plantes et des données relatives au lysimètre R2 et la consommation en eau réelle de ce dernier. [Source personnelle] ..... 37

Figure 22 : Comparaison de la consommation en eau journalière du lysimètre R2 du compartiment de référence avec les estimations de transpiration du modèle 1 et du modèle 2 après régression linéaire. [Source personnelle]..... 38

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de variance de l'indice de surface foliaire par rapport au facteur de régulation et du nombre de feuilles par rapport à ce même facteur. [Source personnelle]..... 16

Tableau 2 : Résultats de l'analyse de variance de l'indice de surface foliaire par rapport au facteur de régulation après réduction artificielle du nombre de feuilles jusqu'à la valeur minimale observée sur l'échantillon (18 feuilles). [Source personnelle]..... 16

Tableau 3 : Résumé des numéros de feuilles représentatives et de leur qualité de prédiction traduite pour les trois méthodes de détection (RLA = recherche de la feuille la plus représentative de la surface foliaire moyenne ; RRMSE = recherche de la feuille démontrant le moins d'écarts entre les valeurs réelles et le LAI estimé à partir de sa surface ; $R^2$ = recherche de la feuille dégageant l'estimation du LAI à l'origine du meilleur $R^2$ en comparaison avec les données réelles). [Source personnelle] ..... 19

Tableau 4 : Résultats de l'analyse de variance du facteur de temps et du numéro de lysimètre sur la variable de consommation en eau avec établissement de groupes de significativité par test de Tukey HSD. [Source personnelle] ..... 31

Tableau 5 : Indicateurs de qualité de prédiction ($R^2$ et RRMSE) des deux modèles pour chaque lysimètre et en moyenne sur l'ensemble, avant et après la phase de calibration. [Source personnelle]..... 36

# 1 INTRODUCTION

Après deux ans et demi d'apprentissage dans le bureau d'études du concepteur de serre Richel Group®, il semblait nécessaire de conclure cette mission par une approche concrète des potentialités du pilotage de serre. Pénétrer le secteur de la production de tomate est une bonne stratégie pour rencontrer des acteurs maitrisant de manière fine les possibilités que proposent des serres équipées high-tech.

Red Sun Farms® est l'un des clients historiques de Richel Group®. L'entreprise est considérée comme l'un des leaders de la production de tomates sur le continent américain et ses surfaces agricoles se situent principalement au Mexique, avec 181 hectares de serres au total. Missionné sur le site de Red Sun Farms® San Miguel (San Miguel de Allende, Querétaro, Mexique), représentant à lui seul plus de 46 hectares, l'objectif était de mettre en place un programme expérimental pour étudier l'efficacité d'un nouveau système de régulation climatique. En effet, depuis Mars 2020, le site de production a équipé 2,6 hectares de serre avec un système de régulation climatique autonome, manœuvrant l'aération, la ventilation, le chauffage et l'irrigation. Le grower n'a plus qu'une très faible quantité de paramètres à indiquer et ses prises de décisions sont très simplifiées. Comme le prix d'une telle solution représente un investissement important, Red Sun Farms® veut pouvoir vérifier les résultats de cette solution technologique avant d'entreprendre un déploiement à plus grande échelle. Le fournisseur n'ayant développé cette offre qu'en 2019, n'est actuellement pas en mesure de proposer de tels résultats.

Le principal argumentaire de ce dernier sur son outil, est le maintien d'une activité transpiratoire maximale. Selon lui, c'est sur ce critère que doit être concentrée la production afin d'en maximiser les performances agronomiques. Nous nous demanderons donc principalement, en le comparant à un système de référence, comment le système de régulation autonome influence-t-il le taux de la transpiration de la plante ? Nous essaierons aussi d'évaluer l'impact de ce dernier sur d'autres paramètres agronomiques. Comment celui-ci agit-il sur le rendement ? Est-il possible d'observer des différences notables dans la qualité des fruits des deux systèmes ? Quelles sont ses conséquences sur l'équilibre végétatif-génératif de la plante ? Des différences dans la surface foliaire sont-elles visibles ?

Les mesures faites sur le terrain nous aideront, en plus de répondre à cette problématique, à valider des outils permettant à l'entreprise d'augmenter son niveau de technicité, de prédiction, de pilotage et de lecture de sa production. Ces outils, en l'occurrence, un modèle d'estimation non destructif de la surface foliaire, et un modèle d'estimation de la transpiration, seront donc développés en parallèle de l'analyse du système de régulation autonome. L'indice de surface foliaire est un paramètre nécessaire pour modéliser l'activité de la transpiration. Il est donc impératif de pouvoir le mesurer ou l'estimer avant d'initier la phase de modélisation de la transpiration. Deux expérimentations seront donc mises en place : une expérimentation de mesure et de modélisation de la surface foliaire sur un couvert de tomates d'une même variété dans un système serre de référence en comparaison avec un autonome, et une seconde expérimentation visant à mesurer et à modéliser la transpiration, tout en comparant les rendements et la qualité des fruits récoltés.

Ainsi, après avoir présenté un contexte global du développement technologique des serres actuelles et de l'importance du paramètre de la transpiration, nous présenterons la première expérimentation, son contexte scientifique, sa méthodologie de mise en place et ses résultats. Nous développerons ensuite la partie résumant la deuxième expérimentation en suivant le même schéma que celui du chapitre précédent. Nous dresserons finalement une conclusion générale et ouvriront cette étude vers des perspectives d'optimisation et des pistes de travail pour d'éventuels futurs travaux.

# 2 CONTEXTE DE L'ETUDE

## 2.1 LA TECHNOLOGIE ET L'AUTOMATISATION DES SERRES

Dans un contexte de croissance démographique forte et d'évolution de la consommation, notamment sur la localité et la fraicheur des produits (Hemming et al. 2020; Wang, He, & Luo 2020), la pression exercée sur les systèmes agricoles a rarement été aussi élevée (Aznar-Sánchez et al. 2020). L'approvisionnement en nourriture est en effet le plus gros challenge du 21ème siècle. Avec près de 275 millions d'hectares de parcelles agricoles irriguées actuellement, le monde agricole est d'ores et déjà capable d'assurer 45% de la production alimentaire totale. Mais pour satisfaire l'augmentation des besoins alimentaires que connaitra notre monde en 2050, il nous faudrait augmenter ces surfaces de 70% (Aznar-Sánchez et al. 2020). Face à ce constat, deux schémas d'évolution s'ouvrent à nous. Définir une politique d'augmentation des surfaces en sachant que le foncier se fait rare et que la conversion des terres vers des systèmes agronomes représente une des plus importantes menaces pour les écosystèmes, (Aznar-Sánchez et al. 2020; Garnett et al. 2013) ou augmenter la capacité de production des surfaces déjà existantes. L'intensification durable est sans aucun doute le tournant le plus probable que va emprunter l'agriculture dans les années à venir (Aznar-Sánchez et al. 2020).

L'intensification durable de l'agriculture est un terme utilisé depuis 2008. Sa première parution dans la déclaration de la FAO sur le besoin alimentaire de la population en 2050 en décrit la définition. Son objectif est d'augmenter la capacité de production agricole d'une même surface tout en diminuant au maximum ses impacts négatifs sur l'environnement. L'augmentation technologique, le transfert technique depuis d'autres secteurs et l'intensification de systèmes jusque-là extensifs sont tous des moyens pour atteindre cet objectif et s'attaquer à des problèmes concrets comme l'excès d'utilisation de l'azote et le rejet important de gaz à effet de serre (Aznar-Sánchez et al. 2020).

Pour le monde agricole, l'intensification des surfaces existantes est une perspective prometteuse dont les serres représentent la meilleure option (Aznar-Sánchez et al. 2020). C'est ce contexte qui justifie entre autres, l'expansion constante des surfaces cultivées sous serre dans le monde durant ces dernières décennies (Aznar-Sánchez et al. 2020; Hemming et al. 2020; Wang, He, & Luo 2020). En effet, les systèmes serres, en plus d'assurer une augmentation de la capacité de production surfacique, permettent également de répondre à d'autres enjeux majeurs. Maximiser l'efficience de l'utilisation de la ressource en eau (Elings et al. 2004; Hemming et al. 2020), déployer des systèmes hors-sols permettant de valoriser des surfaces jugées comme inaptes à toute activités agricoles et limiter la pollution générée en optimisant l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires (Aznar-Sánchez et al. 2020) sont d'autres promesses que semblent annoncer le secteur technologique des serres.

Véritable reflet de l'intérêt de ces systèmes et de la justification de son essor, la littérature scientifique n'a cessé d'être de plus en plus dynamique sur le sujet. Depuis 20 ans, les parutions sur le sujet des technologies en serre sont en constante augmentation mais une hausse encore plus forte de l'activité est remarquée depuis ces 5 dernières années où l'on retrouve entre autres, pour la base documentaire renommée Elsevier Scopus, près de la moitié de la totalité des articles publiés. En effet, le nombre d'articles a été multiplié par 6 en 20 ans (Aznar-Sánchez et al. 2020). La figure 1 illustre cet engouement et montre le taux d'évolution annuel des articles parus sur le thème des technologies de serre. Comparé à celui de l'agriculture en général, il est facile de remarquer que cette filière spécifique s'avère être très dynamique sur le développement de connaissances et d'innovations (Aznar-Sánchez et al. 2020).

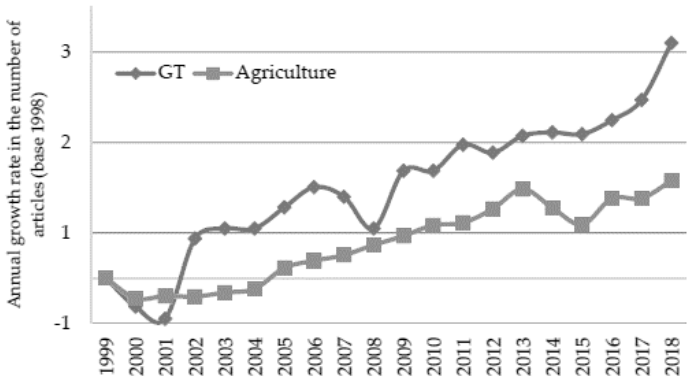



*Figure 1 : Taux d'évolution annuel du nombre d'articles parus sur le sujet des technologies sous serre et de l'agriculture sur la base documentaire Elsevier Scopus de 1999 à 2018. [source (Aznar-Sánchez et al. 2020)]*

Cette évolution se justifie par la très forte augmentation d'auteurs référents, dont le nombre a pu être multiplié par 10 en 20 ans, la hausse presque similaire des revues spécialisées, la focalisation de grandes institutions avec l'exemple de *l'Université d'Alméria* en Espagne, la *Chinese Academy of Science* et la *Wageningen University and Research*, et l'émergence de grandes nations comme la Chine, avides de développer leur expertise pour répondre aux besoins spécifiques de leurs territoires (Aznar-Sánchez et al. 2020). Au travers de cet engouement scientifique et technologique, 6 grandes thématiques se démarquent : le management de l'irrigation, l'ingénierie de structure des serres, la conservation des sols, la consommation énergétique, la régulation climatique, et la protection sanitaire. La majorité de ces sujets correspond d'ailleurs aux principaux enjeux de l'agriculture actuelle pour lesquels les spécificités du secteur de l'agriculture sous serre sembleraient apporter des réponses.

Bien que durant la genèse du développement technologique sous serre la recherche semblait focalisée sur l'augmentation de la productivité et la réduction des coûts de production en proposant surtout des aides au dimensionnement, la recherche s'axe maintenant sur le développement de systèmes durables établis dans un compromis économique, environnemental et social. Ainsi, il est de plus en plus question de sujets portants sur l'automatisation, le suivi de culture en ligne, ou le déploiement de nouveaux capteurs permettant de maitriser au mieux le système de production et de faciliter les prises de décision pour répondre plus efficacement aux enjeux précédemment évoqués.

Une serre est un système complexe que l'on peut facilement résumer par le qualificatif MIMO signifiant, multi-inputs, multi-outputs (Hemming et al. 2020). En effet, la mise en relation entre son microclimat et le couvert végétal qui y évolue, entraine un très grand nombre de variables mobilisées et impactées (López-Cruz et al. 2018). Les relations des variables de ces systèmes sont complexes, dynamiques et généralement non linéaires (Salazar et al. 2015). Le développement technologique des serres peut donc également être un moyen d'aide à la décision au développement de compétences.

Actuellement, dans une serre de haute technologie, le chef de culture définit des consignes qui vont permettre de piloter la température, l'humidité, le $CO_2$, l'ombrage, la lumière artificielle, la ventilation, l'aération ou encore la ferti-irrigation. Grâce à un réseau de capteurs, il peut suivre en temps réel le comportement du microclimat de la serre et en adapter les consignes (Hemming et al. 2020). Les décisions prises par ces chefs de culture sont de plus en plus complexes. En effet, l'équilibre entre la maximisation de la production et la réduction des ressources utilisées, devient difficile à maitriser car il demande des compétences élevées et dépend du niveau de connaissances du grower (Wang, He, & Luo 2020).

Le développement d'outils automatisés et de modèles peut permettre d'assister la prise de décisions complexes (Hemming et al. 2020), d'appuyer des zones géographiques où les compétences sont limitées (Hemming et al. 2019) et de prédire des scénarios de productions (Elings et al. 2004). Un modèle permet de représenter un système réel de manière idéale et simple en formulant mathématiquement les relations les plus représentatives de son comportement (Maire 2012). En horticulture, la modélisation a deux objectifs principaux : augmenter le niveau de connaissance et améliorer le contrôle du système. (López-Cruz et al. 2018). Dans des systèmes où l'utilisation et la consommation énergétique peut être très importante, cet appui technique semble être une aide absolument nécessaire. C'est pourquoi, il est judicieux de développer des outils adéquats en manipulant des ressources comme l'eau, ressource du développement végétal la plus importante pour laquelle l'efficience ne se trouve que dans une fenêtre étroite bornée d'un côté par les effets négatifs du stress hydrique, et de l'autre par le risque d'asphyxie et de lixiviation. La rencontre du bon compromis nécessaire pour assurer un rendement maximal avec des apports minimaux peut être facilitée par le développement d'outils de modélisation (Kim et al. 2015).

La modélisation dans les serres n'est pas si récente et les premiers travaux relatifs au sujet sont apparentés à la thèse publiée par Bot en 1983 (Bot 1983). Il est à l'origine de la première référence significative de modélisation du climat sous serre, en prenant entre autres en considération des valeurs d'entrées du climat externe comme la température et la lumière, et des caractéristiques propres au système serre comme la température du matériau de couverture, celle de la culture ou encore la teneur en eau du sol. En 1993, Takakura propose un modèle climatique équivalent appliqué à une serre plastique à double paroi (Takakura 1993). Généralement ces modèles mobilisent des processus physiques et biologiques comme la convection, la conduction, la condensation, la transpiration ou encore la photosynthèse pour tenter d'estimer et de prédire le microclimat d'une serre et son évolution. Bien d'autres modèles ont suivi ces deux exemples pionniers par la suite, jusqu'à transformer les serres en de véritables boîtes noires où la collecte de données y est devenue une part entière de leur conduite (Salazar et al. 2015). La modélisation permet de tester des hypothèses, de synthétiser et de transférer des connaissances, de référencer de bonnes conditions culturales et d'explorer les effets induits de ces variables sur la culture (Marcelis et al. 2009). Aujourd'hui, la meilleure utilisation de l'énergie, le contrôle optimal du microclimat, ou encore la gestion autonome de l'irrigation peut facilement être appuyé par ces modèles numériques et mathématiques, mais aussi par des simulations informatiques et des algorithmes (Aznar-Sánchez et al. 2020).

Dans de nombreux autres secteurs comme la médecine, l'automobile ou la robotique, l'intelligence artificielle a montré sa capacité à dépasser l'humain dans la prise de décision complexe. En horticulture, le couplage entre des outils de modélisation et des algorithmes intelligents peuvent notamment permettre d'établir des consignes climatiques de manière automatique (Hemming et al. 2019). L'une des applications récentes la plus concrète de cette idée est la compétition « Autonomous Greenhouse Challenge ». La première édition de 2018 a permis l'affrontement de 5 équipes ayant développées des algorithmes d'intelligence artificielle et d'une sixième équipe considérée comme témoin, composée de chefs de culture hollandais expérimentés. Chaque équipe a ainsi pu conduire une culture de concombres dans des compartiments de serres high-tech équivalents durant 4 mois. Les paramètres de gestion climatique, d'irrigation et de rendement ont ainsi permis de les comparer et d'observer leurs différents revenus nets. Autant, lors de cette première édition, l'équipe de référence a su montrer de bonnes performances et rester compétitive, autant la seconde édition a montré des résultats fortement différents. Malgré une complexité plus élevée avec une culture de tomates cerises s'étalant sur une plus longue période, dans un contexte climatique aux saisons plus marquées, et des variations de prix dépendantes de la qualité des produits, les équipes

mobilisant des algorithmes ont en majorité surpassées les growers avec jusqu'à 11% de rendement en plus et un profit net multiplié par 2 (Hemming et al. 2020).

Par conséquent, l'avancement technologique dans les serres à l'heure actuelle permet au secteur de s'automatiser et de bénéficier d'outils d'aide à la décision performants. Dans la situation de pandémie globale que nous connaissons, l'utilité de cet accompagnement n'a jamais été aussi pertinent (Hemming et al. 2020).

C'est dans ce contexte général que la société Priva® commercialise en 2019 sa solution de régulation climatique autonome Plantonomy®. Même si les détails caractéristiques et de fonctionnement de ce service nous sont jusqu'à présent inconnus, le fabricant indique avoir basé les règles de décision de son outil vers une maximisation de la transpiration, apparemment corrélée à de meilleures performances agronomiques.

### 2.2 LA TRANSPIRATION COMME INDICATEUR DE PERFORMANCES AGRONOMIQUES

La transpiration est considérée comme le moteur principal des flux hydriques dans la plante. En effet, elle permet la circulation de l'eau absorbée par les racines dans le restant des organes, et achemine ainsi les sels minéraux essentiels au bon fonctionnement de la plante. Régit par de nombreux paramètres climatiques, dont la température, l'humidité ou le vent, c'est surtout le rayonnement solaire qui va jouer sur son activité. En convertissant l'énergie solaire en chaleur latente, l'eau contenue dans les stomates s'évapore et assure le processus de transpiration (Durand 2007). Le gradient de potentiel hydrique entre le sol et la plante et la différence du déficit pression vapeur (DPV) entre l'intérieur des stomates et l'atmosphère sont également des processus jouant un rôle clé dans le transport de l'eau des végétaux (Zhang et al. 2017). La transpiration représente plus de 90% de l'eau absorbée par les plantes, le restant étant employé pour la croissance (Bontsema et al. 2007). Même si la relation entre ces deux processus est forte, celle-ci n'est pas constante. Elle varie par exemple entre le jour, où la transpiration est généralement supérieure à la consommation en eau, et la nuit où elle reste en deçà de cette absorption. Des DPV élevés vont entrainer les mêmes effets que le jour et augmenter le taux de transpiration par rapport à celui de l'absorption alors que des DPV faible généreront une tendance contraire (Kramer 1937). Bien que dans des conditions d'apports en eau limités, la transpiration pourrait amener la plante dans un état de stress hydrique, il semblerait qu'en condition non limitante d'irrigation comme en serre, la maximisation de ce paramètre présenterait un intérêt. Une agriculture efficiente et durable dépendrait donc de la compréhension de la réponse du rendement par rapport à la consommation en eau d'une culture sous des conditions environnementales spécifiques (Ben-Gal et al. 2003).

Selon certains auteurs, la variable la plus importante caractérisant les performances agronomiques d'une production sous serre, le rendement, semble être principalement régit par le processus de transpiration. La réduction de la surface foliaire et les carences visibles en calcium et en potassium, observables dans les conditions humides spécifiques à la période hivernale du climat tempéré européen, seraient liées à une diminution de l'activité transpiratoire et du rendement des cultures sous serres. Les éléments calcium et potassium sont en effet principalement transportés par le xylème, dont le débit est régulé par la transpiration. Aussi, dans un environnement humide, le DPV est fortement réduit. La pression exercée entre l'atmosphère et la plante, à l'origine du flux transpiratoire, diminue, entrainant donc une pareille diminution de la transpiration (Jolliet et al. 1993).

En 2002, après avoir menée une culture de tomates avec des conduites de stress liées à des apports en bore et à une salinité plus ou moins élevée, provoquant des taux de transpiration différents, des chercheurs ont ainsi pu observer une relation entre la biomasse totale de la culture et sa transpiration (Ben-Gal & Shani 2002). Reconduite en 2003, la seconde

expérimentation confirme cette relation et la définit comme encore plus forte durant la phase du développement des fruits, à partir de 10 à 11 semaines après la plantation. Le coefficient de détermination de cette relation s'élève jusqu'à une valeur de 0,94 durant cette période, et il culmine à 0,96, 13 à 15 semaines après la plantation, durant la période de récolte. Cette augmentation de la puissance de la relation dans le temps s'explique ici par la durée des modalités de stress, qui avec le temps, impactent plus fortement la culture et sa transpiration (Ben-Gal et al. 2003).

Une expérimentation menée en 1993 a aussi pu définir une relation entre la transpiration et le rendement. Conduite sur une culture de tomates sous serre, 16 compartiments ont ainsi été pilotés avec quatre consignes de DPV différents, depuis une consigne faible jusqu'à une consigne élevée, de 0,1, 0,2, 0,4 et 0,8 kPa respectivement. Chacune des modalités étant répliquée 4 fois. Les résultats, montrant une relation linéaire croissante entre l'augmentation du DPV et le rendement, ont ainsi pu conduire à un modèle de prédiction de l'évolution de ce dernier dont le coefficient de détermination s'élève à 0,89. Malgré tout, cette relation n'est pas basée sur des valeurs de transpiration absolues mais sur une activité relative entre la différence ($\Delta E_{tt}$) de la transpiration accumulée de l'une des modalités ($E_{tt\,x}$) par rapport à celle de la modalité la plus humide ($E_{tt\,hh}$) multipliée par un facteur temps ($\Delta t$) d'une part, et de la transpiration accumulée dans la modalité en question d'autre part ($E_{tt\,x}$) (Jolliet et al. 1993) :

$$\Delta E_{tt} = (E_{tt\,x} - E_{tt\,hh})\Delta t \qquad (1)$$

Cette activité de transpiration relative, calculée pour la période de jour et la période de nuit est ensuite multipliée par un paramètre empirique ($\alpha_4 = 0.079$) pour conduire au modèle de prédiction de l'augmentation du rendement ($\Delta Y$) final ci-dessous (Jolliet et al. 1993) :

$$\Delta Y = \alpha_4 . \left[ \left( \frac{\Delta E_{tt}}{\Delta E_{tt\,x}} \right) jour + \left( \frac{\Delta E_{tt}}{\Delta E_{tt\,x}} \right) nuit \right] \qquad (2)$$

D'autres travaux plus anciens avaient déjà émis l'hypothèse d'une équivalence entre une transpiration relative, ratio entre la transpiration à un moment donné et une transpiration potentielle, et un rendement relatif, proposant ainsi des pistes de prédiction de l'évolution du rendement basée sur la modélisation de la transpiration (Hanks 1974). Des travaux de recherche précédemment cités ont ainsi étudiés la relation entre le rendement relatif et la transpiration relative lors d'une campagne de production de tomates, et ont confirmé cette équivalence. Effectivement en comparant le ratio entre le rendement et le rendement maximum avec celui de la transpiration et de la transpiration maximale, une relation linéaire robuste est observée, suivant un coefficient de détermination de 0,88 (Ben-Gal et al. 2003).

Malgré tout, se focaliser uniquement sur la maximisation de la transpiration ne fait pas l'unanimité et d'autres références ne démontrent pas toujours une relation linéaire croissante entre la transpiration et la production d'une culture. Une analyse fine du déficit pression vapeur menée par certaines études contrecarrent les arguments précédemment cités. En effet en comparant deux systèmes serres de tomates pilotés sous des DPV différents, l'un conduit avec un DPV élevé, maintenu entre 4 et 5 kPa en consigne de milieu de journée, et l'autre avec un DPV bas, fixé entre 1 et 2 kPa, ces travaux ont permis de tirer d'autres conclusions. Il est vrai que sous des DPV plus élevés, la transpiration est significativement plus haute. Cependant l'activité photosynthétique y est fortement plus faible. Les pertes en eau élevées de la modalité à DPV ont régulièrement entrainé des diminutions de la pression de turgescence et donc de fortes variations dans le niveau d'ouverture des stomates. Sous des DPV plus faibles, la régularité de l'ouverture de ces dernières assure une meilleure conductance stomatique, permettant ainsi une plus grande assimilation du $CO_2$ et une activité photosynthétique plus élevée (Zhang et al. 2017). Les réponses agronomiques à ces

différences physiologiques se caractérisent par un rendement significativement plus élevé et par une efficience de l'utilisation en eau plus forte. Pour une même quantité d'eau consommée, les plantes de la modalité à DPV faible vont en effet pouvoir produire une quantité de fruits plus importante (Zhang et al. 2017).

D'autres auteurs ont pu confirmer ces conclusions en comparant également des systèmes pilotés sous des déficits pression vapeur élevés et faibles. En maintenant le déficit en dessous d'un seuil maximal fixé à 0,8 kPa via un dispositif de brouillard pour la modalité faible, les réponses agronomiques sont similaires. Le taux de croissance relative du rendement, paramètre permettant d'évaluer ce dernier entre plusieurs mesures temporelles successives, est fortement plus élevé dans un environnement où le DPV est plus faible. Dans cette étude, les mêmes constats sont faits sur la transpiration, la conductance stomatique et la photosynthèse nette (Lu et al. 2015). Malgré cette diminution de rendement induite par une diminution du poids propre aux fruits, des DPV plus élevés peuvent toutefois permettre d'améliorer leur qualité. La teneur en sucre peut être jusqu'à 20% plus élevée dans des modalités où le DPV est plus fort. Cette amélioration semble être liée à un effet de concentration causée par la réduction de la masse des fruits et de leur teneur en eau (Leonardi, Guichard, & Bertin 2000).

Le DPV optimal pour une culture de tomates oscille entre 0,5 et 0,7 kPa (Lu et al. 2015). Il faut donc aussi prendre en considération que tenter de diminuer à tout prix ce déficit n'est pas non plus une bonne règle de conduite. Des déficits trop bas de 0,1 kPa, peuvent ainsi entrainer des rendements plus faibles et une diminution de la proportion des fruits commercialisables en catégorie extra (Mulholland et al. 2001). La gestion du DPV ne peut donc pas se baser uniquement sur une conduite d'augmentation ou de diminution mais doit évoluer dans un équilibre constant, permettant à la culture de maximiser l'efficience de l'utilisation de la ressource en eau et les rendements tout en maintenant une bonne qualité.

La littérature ne semble donc pas acter une relation simple entre la transpiration et le rendement. Une activité transpiratoire est nécessaire au bon fonctionnement des plantes et est liée au maintien de l'ouverture des stomates, soit à une meilleure activité photosynthétique. Mais au-delà de certains seuils, les effets négatifs précédemment évoqués peuvent être observés. Aussi, sans une bonne expertise de la conduite de l'irrigation, une trop forte transpiration peut mener à des stress hydriques et à une inhibition de l'absorption du $CO_2$ et de la photosynthèse (Nemeskéri et al. 2019). Enfin, d'autres variables que celle de la transpiration, comme le niveau d'enrichissement en $CO_2$ ou le rayonnement, semblent avoir une meilleure puissance d'estimation et de prédiction du rendement en culture sous serre (Salazar et al. 2015).

Le programme expérimental que résume ce mémoire a été mis en place pour comprendre quelles étaient les influences du système climatique autonome sur la culture étudiée en tentant d'identifier d'éventuelles relations et liaisons entre une transpiration à priori plus élevée et des différences de rendement. Comme les données collectées pour tenter de comprendre ces influences permettront également de valider des modèles de transpiration et que ces derniers dépendent de l'indice de surface foliaire, l'expérimentation liée à la mesure et à la modélisation de ce dernier a donc été la première étape de ce programme.

# 3 MODELISATION DE L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE ET ANALYSE DE SES CARACTERISTIQUES SOUS UNE REGULATION AUTONOME

## 3.1 INTRODUCTION

L'indice de surface foliaire traduit la surface végétale présente sur une unité de surface agricole. Cet indice peut être considéré sans unité car il exprime des mètres carrés de feuillage par des mètres carrés de surface de production. Il peut également être présenté par ce rapport surfacique ($m^2.m^{-2}$) Connaître et exprimer cet indice présente des intérêts multiples dans la conduite d'une culture agricole.

Le rayonnement est le principal facteur influençant le rendement pour de nombreuses cultures et spécifiquement dans le cas d'une culture de tomate. Ce rayonnement est la ressource énergétique permettant la photosynthèse. Or seul le rayonnement intercepté par la culture peut contribuer à sa bonne activité et à son rendement. Pour la tomate, un indice de surface foliaire (LAI) compris entre 3 et 4 permet une interception lumineuse de 90% à 95% (Marcelis et al. 2009). En effet, en augmentant ce LAI de 2 à 3, cette interception est augmentée de 15%, et en augmentant ce dernier de 3 à 4, le rendement en fruit peut lui augmenter de 4% (Heuvelink et al. 2005).

Le LAI est influencé par la densité de plantation, le nombre de feuilles et la surface foliaire de chaque feuille. L'effeuillage généralement pratiqué dans les systèmes serres de tomates provoque une réduction du LAI, donc de l'interception lumineuse et indirectement du rendement (Heuvelink et al. 2005). Face aux activités d'effeuillages, même si cet indice diminue, la proportion des feuilles juvéniles y augmente, assurant ainsi une meilleure performance photosynthétique (Jo & Shin 2020). Dans une culture de tomates, la croissance végétative et générative se fait au même moment. Il faut ainsi trouver le meilleur compromis entre ces deux types de croissance pour assurer une production optimale (Jo & Shin 2020). Cet équilibre est une préoccupation majeure pour la plupart des chefs de culture de ces systèmes. Une plante conduite sans effeuillage sera en effet plus végétative, augmentera sa production en fruits mais ces derniers auront un calibre et une masse moins important que sur une plante régulièrement effeuillée, qui produira de plus gros fruits en quantité moins importante. Finalement, même si la surface foliaire impacte davantage la charge des fruits et l'acheminement des photoassimilats vers ces derniers, la réponse à sa modification dépend aussi fortement de la variété cultivée (Jo & Shin 2020).

Ainsi, dans un contexte écologique alarmant, la meilleure connaissance de cet indice peut permettre d'assurer de meilleures pratiques agricoles, notamment au travers des activités de protection sanitaire. Les produits sanitaires utilisés en serre sont généralement des produits dont le volume d'apport dépend d'une surface. Si seule la surface agricole est prise en compte, alors des risques de surdosage en début de culture ou de sous-dosage lorsque le couvert est arrivé à maturité peuvent être rencontrés (Sánchez-Hermosilla et al. 2013). Ainsi le LAI permet des applications plus rationnelles en lien avec les besoins réels de la culture, tout en minimisant au maximum les impacts négatifs potentiel sur l'homme et l'environnement (Sánchez-Hermosilla et al. 2013).

En plus de permettre une meilleure lecture des cultures, cet indice est un élément clé pour mieux comprendre la transpiration et la modéliser. En effet, les premiers travaux significatifs sur le thème de la transpiration des plantes ont permis de démontrer qu'une augmentation du LAI entraînait une augmentation de l'activité transpiratoire (Monteith 1965). Les paramètres de résistance aérodynamique et de résistance de surface ou de canopée, paramètres influençant la transpiration, vont ainsi évoluer sous des indices de surface foliaire différents (Gong et al. 2017; 2019; Valdés et al. 2004). La résistance aérodynamique est la résistance

de la végétation face au flux de vapeur de l'air, à la vitesse du vent et à la surface végétale de son couvert. La résistance de canopée traduit elle, la résistance d'ouvertures des ostioles assurant les échanges gazeux et dépend également de cette surface foliaire (Allen et al. 1998). Ainsi la plupart des outils et des équations de modélisation permettant d'estimer la transpiration à ce jour prennent en compte cette indice de surface foliaire (Donatelli, Bellocchi, & Carlini 2006; Gong et al. 2017; 2019; 2021; Martínez-Ruiz et al. 2012; Monteith 1965; Villarreal-Guerrero et al. 2012; Rivera-Zamarripa et al. 2013).

La mesure de l'indice de surface foliaire est une opération chronophage nécessitant généralement la destruction de la plante étudiée. Cette dernière est complètement effeuillée, et l'aire de chacune de ses feuilles est mesurée via des outils spécifiques et des logiciels d'analyse d'images (Blanco & Folegatti 2003). La modélisation est une solution intéressante pour mesurer le LAI sans détruire les individus observés, de manière rapide, facile et en ayant la possibilité de répéter les mesures sur le même échantillon (Blanco & Folegatti 2003). Certains modèles se basent sur une estimation simple du volume de la culture estimée à partir des paramètres de hauteur et de largeur de plantes, de surface et d'inter-rangs. Cette méthode empruntée au secteur arboricole montre de bons résultats en culture de tomates (Sánchez-Hermosilla et al. 2013). Un autre modèle, dont l'utilisation est plus rependue, se base notamment sur l'estimation de la surface foliaire d'une feuille par rapport à sa surface rectangle et sur la recherche d'une feuille représentative qui, multipliée par le nombre de feuilles présentent sur la plante étudiée permettra l'estimation de son LAI (Blanco & Folegatti 2003). Face à un très bon niveau d'estimation et une procédure de modélisation plus précise, c'est la méthodologie de cette dernière référence qui sera utilisée dans cette première expérimentation.

Dans cette étude, les mesures d'indices de surface foliaire permettront de comparer la morphologie des plantes cultivées sous un système classique avec celle du nouveau système de régulation climatique autonome, mais également de valider un modèle d'estimation rapide et non destructif, qui permettra de faciliter les mesures durant les futurs travaux d'analyse chez Red Sun Farms®.

## 3.2 MATERIEL ET METHODES

### 3.2.1 Zone d'étude

Le positionnement géographique et l'altitude du site d'étude, au cœur du plateau Mexicain, lui confère une très bonne qualité lumineuse tout au long de l'année avec une moyenne de somme d'éclairement journalier de 1709 $W.m^{-2}$ (14764 $J.cm^{-2}$) et un DLI moyen de 28 $mol.m^{-2}.d^{-1}$. La latitude faible du site de 21°, lui permet d'avoir une variation très faible de la durée du jour avec une différence de 2h30 entre la durée du jour minimale observée en hiver (10h52) et la durée du jour maximale observée en été (13h24).

L'amplitude thermique reste également faible avec une différence de 10,7°C entre la température diurne moyenne maximale observée (25,1°C) et la température diurne moyenne minimale (14,4°C) mesurée en 2020. La température diurne moyenne à l'année est de 19,7°C. Le climat local est également sec et l'hygrométrie moyenne diurne dépasse rarement 70%. En effet l'hygrométrie maximale des moyennes journalières diurnes observées en 2020 est de 75%. C'est particulièrement durant le printemps et jusqu'au début de l'été que l'hygrométrie est la plus faible, avec une valeur minimale des moyennes journalières diurnes de 24%.

Le compartiment de référence et le compartiment autonome sont deux compartiments limitrophes. La surface du premier est de 23 520 m² et la totalité de sa surface est cultivée avec la variété Merlice®, celle du second est de 24 964 m² mais seule sa moitié sud de 12 482 m² est occupée par le cultivar étudié. La partie sud et la partie nord de chaque

compartiment sont séparées par une allée centrale. Les deux compartiments font partie d'une serre à double parois gonflables. Le compartiment autonome intègre une serre Harnois® avec 6,5 mètres sous chéneau et 14,4 mètres de largeur de chapelle, et le compartiment de référence se situe dans une serre Richel® avec la même hauteur sous chéneau mais avec une largeur de chapelle de 16 mètres. Les deux serres sont équipées d'un réseau de chauffage distribué par des émetteurs à haute température, de brasseurs verticaux et d'un réseau de distribution de $CO_2$ via des gaines perforées disposées au niveau de chaque rang. Si la température dépasse les consignes fixées et en plus du réseau de brasseurs précédemment cité, deux ouvrants continues en toiture par chapelle permettent de réguler le climat interne.

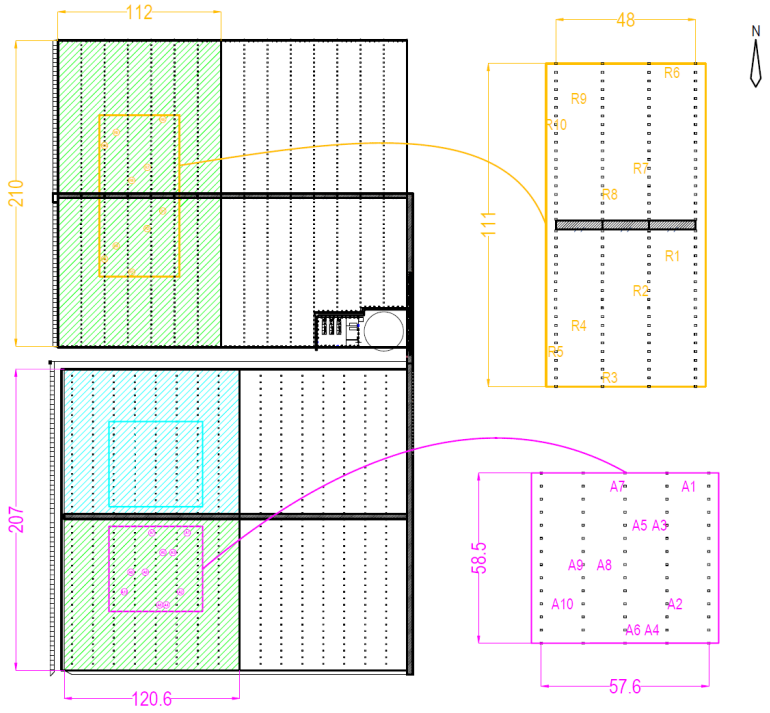



*Figure 2 : Plan de la zone d'étude de l'indice de surface foliaire*

*Avec le compartiment de référence au nord-ouest et le compartiment autonome au sud-ouest. Les hachures vertes correspondent aux zones cultivées avec la variété Merlice®, et la zone hachurée bleue à la zone cultivée avec l'autre variété, Provine®, où 5 plantes ont été prélevées pour évaluer la généricité du modèle. La partie est et ouest de chaque compartiment est séparée par une paroi alors que la partie sud et nord est divisée par une allée centrale. La zone de prélèvement des plantes de référence est symbolisée par le rectangle jaune, celle du compartiment autonome par le rectangle magenta et celle de la variété Provine® par le rectangle bleu. La position des plantes est indiquée par un numéro précédé d'un préfixe correspondant à l'initiale de chaque modalité (A pour autonome et R pour référence). Les unités sont en mètres. [Source personnelle]*

Pour cette expérimentation des plants du cultivar Merlice® seront étudiés. Ce cultivar sélectionné par De Ruiter® (Pays-Bas) produit des grappes de fruits de 145 à 160 grammes. Il représente quasiment l'intégralité de la production de Red Sun Farms® et peut être planté à différentes périodes de l'année. Il est aussi adapté à des cycles longs allant de 40 à 42 semaines de récolte.

Les plantes concernées par l'expérimentation ont été plantées le 18/08/2020 pour la modalité témoin et le 23/09/2020 pour la modalité autonome, à une densité de 30 500 plants par hectares, avec un espace inter-rang de 1,6 mètres et de 1,78 mètres pour le compartiment autonome et le compartiment de référence respectivement. Un vide sanitaire de deux semaines précède cette plantation. Les pieds sont des plants simples non greffés. Ils sont cultivés dans des cubes de laine de roche Grodan® posés sur des pains de fibres de coco de

Biogrow® de 18 litres. Les plants sont clipsés et égourmandés une fois par semaine depuis la plantation, et les bouquets sont taillés à 5 fruits. L'effeuillage de 3 feuilles par plants se fait à une fréquence hebdomadaire. La récolte est effective depuis le 14/10/2020 pour le compartiment témoin et depuis le 17/11/2020 pour le compartiment autonome. Celle-ci est réalisée tous les deux jours. Les plants sont conduits sur un fil métallique disposé à 3,5 mètres au-dessus du sol et sont descendus une fois par semaine en fonction de leur croissance, de 22 à 44 cm. Les pains sont posés sur des plaques surélevées, directement au-dessus du sol. La ferti-irrigation se fait via un réseau de goutteurs fonctionnant à un débit de 2 litres par heure. Chaque plant dispose d'un gouteur et deux autres goutteurs alimentent directement le pain entre les cubes de plantation. Les rangs sont situés au-dessus de tranchées de drainage chargées d'un substrat de gravier. En fin de rang, ces tranchées rejoignent un collecteur commun. L'ensemble des équipements de la serre est piloté par un ordinateur climatique Priva®.

Deux périodes de consignes de températures existent dans les serres de Red Sun Farms®. Durant la période hivernale, du 1er novembre au 15 février, la consigne de température moyenne sur 24 heures est fixée entre 19 et 19,5°C, la température diurne maximale ne doit pas dépasser 26°C et la température nocturne minimale ne doit pas descendre en dessous de 16°C. Le reste de l'année, la consigne de température moyenne sur 24 heures oscille entre 20 et 22°C avec une température diurne maximale de 28°C et une température nocturne minimale de 15,5°C. Le contrôle de l'humidité se fait via une plage de déficit hydrique définit comme étant un intervalle de confort. Le jour, cette plage s'étend de 7 à 9 $g.m^{-3}$ alors que la nuit elle se borne entre 1,8 et 2,5 $g.m^{-3}$. Le $CO_2$ est injecté en permanence durant le jour pour maintenir une concentration comprise entre 600 et 1000 ppm dans l'espace de production. Les apports en eau se font à fréquences fixes le matin (de 9h à 11h), toutes les 30 à 45 minutes en fonction de l'ensoleillement, alors que pour le restant de la journée, la fréquence des arrosages est uniquement définie par le rayonnement, en suivant une consigne d'apport entre 2,8 et 3,2 $cc.J^{-1}.cm^{-2}$. La nuit, un déclenchement d'arrosage peut être fait face à une trop forte perte d'humidité des substrats contrôlée grâce à un réseau de balance (1 pour 2 compartiments). Le matin, la conductivité de la recette est fixée à 2,8 $mS.cm^{-1}$ et la journée elle diminue à 2,4 $mS.cm^{-1}$. Le taux de drainage de la solution est de 40% et sa conductivité ne doit pas dépasser 4,5 $mS.cm^{-1}$. Les consignes de la régulation du compartiment autonome ne sont pas connues.

### 3.2.2 Dispositif expérimental

Les deux modalités du facteur de régulation climatique ont été représentées par chacun des compartiments. Une analyse préliminaire de la surface rectangulaire de la feuille la plus basse de plusieurs plantes dans les deux compartiments ne nous a pas permis d'identifier une variation remarquable entre des plantes limitrophes ou pouvant être expliquée par un positionnement différent dans l'espace. Ainsi les parcelles élémentaires ont été composées d'une unique plante et ont été réparties dans toute la zone d'étude. Afin de limiter les biais que peuvent entrainer les effets de bordures, les plantes ont été sélectionnées dans les chapelles les plus au centre des compartiments, de la chapelle numéro 3 à la chapelle numéro 6 pour le compartiment autonome, et de la chapelle numéro 3 à la numéro 5 pour le compartiment de référence. Aussi, les travées les plus éloignées de l'allée centrale n'ont pas été pris en compte dans l'espace d'études. Seules les 13 premières travées ont été prises en compte dans le compartiment autonome, représentant une longueur de 58.5m, et les 17 premières du compartiment de référence, où les travées plus étroites ont définit la longueur maximale de l'espace d'étude à 51 mètres de chaque côté de l'allée centrale. Un rang étant composée de deux rangées de plantes, l'une à l'ouest l'autre à l'est, les deux côtés ont été choisis de manière alternée.

10 parcelles élémentaires pour chaque modalité ont été choisies dans ces deux zones d'études et un système de codification a permis l'enregistrement numérique de leur positionnement et une identification physique par étiquetage leur a été attribuée. Le code de chaque plante indique son matricule, reprenant l'initiale de sa modalité suivie d'un chiffre, son numéro de chapelle, son numéro de rang, le numéro du poteau aligné à sa position, le côté sud ou nord du compartiment ainsi que son sens sur le rang, est ou ouest. Cette codification, en permettant la cartographie des plantes sélectionnées, en a facilité l'accès pendant l'étude et nous a aidé à interpréter certains résultats.

### 3.2.3 Méthodes

Les plantes sélectionnées ont été intégralement effeuillées. Chaque feuille, a été étiquetée en suivant la codification suivante : « Code de modalité/N°_Plante/N°_Feuille », la feuille numéro 1 étant la feuille située juste en dessous du bouquet de formation. La hauteur du nœud d'insertion de chaque feuille et la hauteur de chaque plante a été renseigné dans une fiche de notation prévue à cet effet. Après chaque mesure et étiquetage, les feuilles ont été placées dans un caisson en polystyrène afin de conserver leur état initial jusqu'à la phase de mesure effectuée moins de 10 minutes après la récolte de la dernière feuille.

Une fois l'ensemble des plantes effeuillées, la surface réelle de chaque feuille a été mesurée via l'application mobile Easy Leaf Area (Easy Leaf Area Free version 1.02) qui mesure la surface d'un objet par analyse de couleur à partir d'un étalon de 4 cm² de couleur rouge. Dans le but de maximiser la qualité de cette mesure, les feuilles ont été placées partie inférieure du limbe vers le haut entre deux plaques d'acrylique, dans une chambre de mesure isolée de toute sources lumineuses naturelles, et dont les surfaces d'analyse ont été recouvertes d'un plastique blanc. L'utilisation d'un trépied a permis de fixer l'emplacement de l'objectif durant toute l'expérimentation. Ces mesures ont ensuite été mobilisées pour définir la surface moyenne d'une feuille pour chaque plante et pour analyser les effets du facteur de régulation climatique sur la morphologie foliaire.

Une première série de notations a été réalisée entre le 20 et le 28 mai 2021. Initialement ce sont deux compartiments limitrophes et complètement identiques sur le plan structurel qui ont été comparés. Néanmoins seule la première chapelle du compartiment de référence était occupée par les plantes de la variété étudiée. Un ensemble de problèmes rencontrés durant cette première partie ne nous a pas permis d'exploiter les données récoltées. Deux erreurs majeures dans la procédure de prélèvement et d'analyse ont rendu les résultats inexploitables. Pour le prélèvement des feuilles de la première série, la première feuille pour chaque plante a été prélevée en dessous du premier bouquet en phase de nouaison. Les feuilles situées en dessous de ce bouquet possèdent déjà une surface foliaire conséquente et la dynamique de croissance visible à partir des feuilles plus jeunes au-dessus de ce dernier n'a pas pu être étudiée et a diminuée notre capacité d'interprétation des données. Mais l'erreur la plus importante a été causée par un problème de calibration de l'outil d'analyse colorimétrique. Durant cette première analyse, la chambre de mesures n'a pas complètement été isolée de la lumière naturelle. Ainsi, au cours de la journée et en fonction du temps, l'outil de mesure de surface foliaire a dû être recalibré plusieurs fois tout au long de la période d'analyse, afin de corriger les effets de la variation de lumière sur la couleur des feuilles étudiées. Les balances de couleurs paramétrées, différentes de jours en jours et au cours d'une même journée, n'ont pas permis une mesure correcte de la surface foliaire des échantillons, et il nous a été impossible d'établir une quelconque relation entre les surfaces rectangulaires des feuilles et leurs surfaces foliaires réelles. La remise en place nécessaire des mesures n'a pas pu être réalisée dans le compartiment initial car le nombre limité de plantes dans cette zone ne nous a pas autorisée à en détruire davantage. C'est cette seconde série de notations qui a été conduite dans les conditions précédemment présentées qui sera analysée.

Les notations ont été réalisées du 4 juin au 10 juin, et du 14 au 17 juin 2021 sur les plantes du compartiment de référence et du compartiment autonome respectivement. 5 plantes ont également été prélevées le 17 et 18 juin, du côté nord du compartiment autonome. La mesure de ces plantes, représentant un échantillon d'une autre variété (Provine®) et ayant suivi exactement la même procédure que celle énoncée plus haut, nous a permis de tester la généricité du modèle face à l'estimation d'indice foliaire de cultivars différents. Les notations des plantes du compartiment de référence s'étalent sur une période légèrement plus longue que celles du compartiment autonome pour deux raisons. Celles-ci ont commencé un vendredi et aucune mesure n'a pu être réalisée le week-end. Ces deux jours d'absence sont en partie responsable de cette longueur. Aussi, face à l'échec de la première série de données, nous avons voulu sécuriser cette nouvelle prise de notations en y augmentant les variables étudiées, notamment en intégrant un comptage du nombre de folioles par feuilles et une mesure de la longueur et de largeur de ces dernières, dans l'idée d'augmenter le potentiel d'estimation des surfaces foliaires. L'ajout de telles variables a significativement augmenté la durée des mesures en la multipliant par un facteur 2. Une analyse préliminaire des mesures faites sur l'échantillon du compartiment de référence nous a permis d'observer une relation plus forte entre la surface rectangulaire et la surface réelle de chaque feuille que celle observée avec ces variables supplémentaires. Cela nous a permis de confirmer le problème de calibration de la première série d'une part et de nous autoriser à abandonner ces mesures supplémentaires pour la suite d'autre part.

#### *3.2.3.1 Méthodes : influence du facteur de régulation climatique sur la surface foliaire*

Pour évaluer l'effet du facteur, l'indice de surface foliaire a été mesuré pour chacune des plantes en sommant l'ensemble des surfaces foliaires et en multipliant cette somme par la densité de plantation :

$$LAI = \left(\sum_{i=1}^{n} LA_i\right).D \tag{3}$$

Avec $LAI$, l'indice de surface foliaire (m².m-²), $LA_i$, la surface foliaire d'une feuille $i$ (m²), et $D$, la densité de plantation (plantes.m-²) fixée à 3,05 plants par mètre carré dans cette étude.

Une analyse de variance à un facteur nous a permis d'interpréter la significativité de l'effet du facteur sur l'indice de surfaces foliaires des plantes mesurées dans les deux modalités. Un effeuillage artificiel nous a permis de créer un jeu de données annexe où le nombre de feuilles de toutes les plantes a été réduit au nombre de feuille minimum observé durant cette expérimentation (18 feuilles). Le raisonnement à l'origine de la création de cet autre jeu de données était de tenter de réduire le biais potentiel causé par le facteur de durée des mesures. En effet, plus le temps de mesures est long, plus la variation dans le nombre de feuilles peut être importante. Le nombre de feuille augmente dans le temps mais peut aussi être réduit par des activités d'effeuillage. Même si aucun effeuillage apparent n'a été observée pendant les notations, cette activité se réalise normalement toutes les semaines. Ce jeu de données a donc été créé pour limiter ce biais. Malgré tout, le nombre de feuilles influence lui-même la surface foliaire de chacune d'entre elle. Ainsi, même en réduisant artificiellement ce dernier, les caractéristiques des feuilles restantes résultent en partie de ce nombre. Une analyse de variance à un facteur du nombre de feuilles nous a également permis de vérifier la plausibilité de ce biais.

Nous avons évalué la variation de l'indice de surface foliaire des plantes du compartiment de référence par rapport à la position des plantes dans la serre, à leur orientation dans le rang, à la chapelle dans laquelle elles étaient situées et à leur éloignement par rapport à l'allée centrale. Aucun de ces facteurs n'a apporté d'effets visibles sur l'échantillon mesuré et nous

avons considéré les deux espaces homogènes, indépendamment du facteur de régulation climatique.

#### *3.2.3.2 Méthodes : modélisation de l'indice de surface foliaire*

Parallèlement la longueur et la largeur de chaque feuille aura été enregistrée afin d'observer une relation entre la surface rectangulaire et la surface réelle de chaque feuille. Cette relation, identifiée par le biais de régression linéaire, a permis par la suite d'estimer rapidement la surface foliaire à partir de simples mesures de longueurs et de largeurs de feuilles. Afin de développer un modèle simple et facile d'utilisation, l'idée était de rechercher une feuille représentative de l'indice de surface foliaire pour l'ensemble des plantes. Pour juger de cette représentativité, nous avons cherché à identifier la feuille ayant la surface foliaire la plus proche de la surface foliaire moyenne pour chaque plante en utilisant l'indice de surface foliaire relatif :

$$RLA = \frac{LA}{LA_M} \tag{4}$$

Avec $RLA$ (Blanco & Folegatti 2003), la surface foliare relative (cm²), $LA$, la surface foliaire d'une feuille et $LA_M$, la surface foliaire moyenne d'une plante, soit la somme des surfaces foliaires d'une plante divisée par le nombre de feuilles mesurées (cm²).

Ainsi, plus cet indice sera proche de 1, plus la feuille en question aura une surface foliaire identique à la surface foliaire moyenne de la plante. Pour calculer cet indice, nous avons utilisé les surfaces foliaires estimées à partir des surfaces rectangulaires de chaque feuille et nous les avons comparés aux surfaces foliaires moyennes réelles des plantes concernées. Cet indice a été calculé pour chaque numéro de feuille mais aussi pour chaque position relative de feuille. En effet, comme dit précédemment, la hauteur d'insertion de toutes les feuilles a été enregistrée. Cette mesure, confrontée à celle de la hauteur des plantes, a permis d'attribuer une hauteur relative pour chaque feuille prélevée, représentant sa position sur la plante. Cette hauteur relative est définie par la relation ci-dessous :

$$RLH = \frac{LH}{PH} \tag{5}$$

Avec $RLH$ (Blanco & Folegatti 2003), la hauteur relative de la feuille par rapport à sa plante hôte (%), $LH$, la hauteur de la feuille, soit la distance entre le sol et son nœud d'insertion (m) et $PH$, la hauteur de la plante depuis le sol jusqu'à l'apex (m).

Cette hauteur relative permet de corriger de plausibles biais morphologiques. En effet, des feuilles portant des numéros différents peuvent se retrouver au même niveau par rapport à la hauteur de la plante, et, à contrario, des plantes portant le même numéro peuvent s'insérer de manière différente sur les différentes plantes étudiées. Après avoir identifié quelle hauteur relative a présenté l'indice de surface foliaire relatif le plus proche de 1, nous avons tenté d'identifier à quel numéro de feuille cette hauteur était apparentée. Pour maximiser la détection de cette feuille représentative, un indice de surface foliaire estimée a été réalisé à partir du produit entre la surface foliaire estimée de chaque feuille et le nombre de feuilles de chaque plante :

$$LAI_{est\ i} = LAR_{i-j}.NB_j.D \tag{6}$$

Avec $LAI_{est\ i}$, l'indice de surface foliaire estimé à partir de la feuille n°$i$ (m².m-²), $LAR_{i-j}$, la surface foliaire estimée à partir du rectangle (définit à partir d'une analyse de régression

linéaire entre la surface foliaire réelle et la surface rectangle de toutes les feuilles prélevées) de la feuille n°$i$ de la plante n°$j$ (m²), $NB_j$, le nombre de feuilles de la plante n°$j$ et $D$, la densité de plantation fixée à 3,05 plantes par mètre carré dans cette étude.

Pour mesurer la qualité de prédiction des indices de surface foliaire estimés, la racine de l'erreur quadratique moyenne fait référence et permet de mesurer les écarts entre des valeurs estimées et des valeurs réelles. Nous l'avons employée sous sa forme relative dont le résultat en pourcentage en facilite la compréhension. Le coefficient de détermination, lui, juge la qualité d'estimation d'une régression linéaire. De ce fait, même si l'écart entre des valeurs réelles et estimées est important, des dynamiques similaires peuvent être repérées par le biais de ce coefficient. Les écarts potentiels des variables présentant les coefficients de détermination les plus importants ont pu être réduits par régression linéaire. Le coefficient de détermination ajusté, joue le même rôle que le coefficient explicatif mais est nécessaire dans le cas d'une régression linéaire multiple car il permet la prise en compte du nombre de variables. Sans ce dernier, le coefficient de détermination croit à mesure que le nombre de variables augmente. Il a également été utilisé dans cette étude :

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{N}} . \frac{100}{\bar{O}} \tag{7}$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \tag{8}$$

$$R'^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \tag{9}$$

Avec, $O_i$, la valeur observée, $P_i$, la valeur prédite, $N$, le nombre de mesures, $\bar{O}$, la moyenne des valeurs observées, $\bar{P}$, la moyenne des valeurs prédites, $n$, le nombre d'individus étudiés et $k$, le nombre de variables employées pour estimer les valeurs réelles.

L'idée étant de construire un outil estimatif polyvalent, nous avons cherché à développer un modèle capable d'estimer l'indice de surface foliaire de toutes les plantes étudiées, indépendamment de leur modalité d'origine. Nous avons donc entrepris une procédure de combinaisons simples, sans répétitions, des différents indices de surface foliaire estimés ainsi qu'une analyse par régression linéaire multiple. Ces deux approches nous ont permis de comprendre si la mesure de plusieurs feuilles nous permettrait d'augmenter notre qualité de modélisation. Afin de créer un outil cohérent avec la réalité, la taille maximale des combinaisons a été limitée à 4 feuilles maximum. Aussi les combinaisons n'ont pas pris en compte les numéros de feuilles supérieurs à 18, ces dernières n'étant pas toujours présentes sur les plantes cultivées dans les serres de Red Sun Farms®.

## 3.3 RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.3.1 Influence du facteur de régulation climatique sur la surface foliaire

Les mesures réelles des indices de surface foliaire nous ont permis d'identifier des différences morphologiques entre les deux systèmes. Dans l'ensemble et comme le montre la figure 3, le LAI des plantes mesurées dans le compartiment autonome semble supérieur.

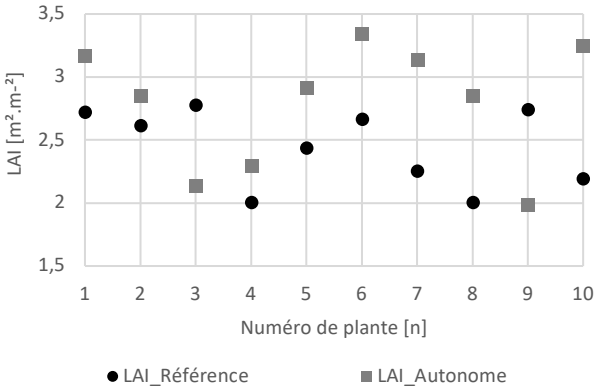



*Figure 3 : Valeurs des indices de surface foliaire mesurés sur les 10 plantes prélevées dans chaque compartiment. [Source personnelle]*

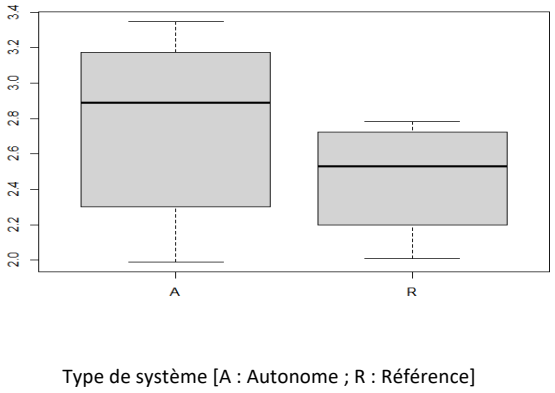



*Figure 4 : Répartitions des valeurs de LAI autour de la médiane de chaque compartiment. [Source personnelle]*

Une analyse de variance à 1 facteur nous a permis de déceler une légère significativité, avec un intervalle de confiance supérieur à 90%, entre les indices de surface foliaire de ces deux modalités (Cf. Tableau 1). L'analyse a été reconduite pour évaluer l'effet du facteur sur le nombre de feuilles. L'idée n'était pas ici de comprendre l'effet de la régulation climatique sur ce nombre mais de savoir si les différences éventuelles des pratiques culturales entre les deux compartiments, notamment les activités d'effeuillage, n'exerçaient pas une influence significative sur ce nombre et indirectement sur les indices de surface foliaire. L'analyse statistique ne nous a pas permis de repérer de différences à ce niveau-là. Le tableau ci-dessous résume les résultats de ces analyses :

*Tableau 1 : Résultats de l'analyse de variance de l'indice de surface foliaire par rapport au facteur de régulation et du nombre de feuilles par rapport à ce même facteur. [Source personnelle]*

| Modalité | LAI | | Nombre de feuilles | |
|---|---|---|---|---|
| | Moyenne (m².m²) | p-valeur | Moyenne (m².m²) | p-valeur |
| Autonome | 2,80 | 0.068 | 21,4 | 0.199 |
| Référence | 2,45 | | 22,4 | |

Même si la nature du compartiment n'a pas d'effets significatif sur le nombre de feuilles, ce nombre varie tout de même d'un individu à un autre. Afin de limiter son impact sur l'indice de surface foliaire, les plantes prélevées ont été artificiellement effeuillées comme énoncé précédemment (Cf. Tableau 2). Bien sûr, malgré ce traitement des données, le nombre de feuilles a forcément influencé la morphologie de ces dernières. L'interprétation de ce nouveau jeu de donnée doit donc être appréhendé avec précaution.

*Tableau 2 : Résultats de l'analyse de variance de l'indice de surface foliaire par rapport au facteur de régulation après réduction artificielle du nombre de feuilles jusqu'à la valeur minimale observée sur l'échantillon (18 feuilles). [Source personnelle]*

| Modalité | LAI | |
|---|---|---|
| | Moyenne (m².m²) | p-valeur |
| Autonome | 2,14 | 0.02 |
| Référence | 1,80 | |

La différence après cet effeuillage est nettement plus marquée et les plantes du compartiment autonome démontrent des indices de surface foliaire significativement plus élevés à un intervalle de confiance de 98% (Cf. Tableau 2). Il semblerait donc que ce soient les feuilles les plus basses des plantes de la modalité de référence qui permettent à celles-ci d'avoir une surface foliaire plus proche de celle de l'autre modalité. Face à ce constat au moins deux hypothèses peuvent être abordées. La première serait que l'influence de la régulation climatique est plus forte sur les feuilles en développement. En effet, avec cet effeuillage artificiel, nous avons augmenté la proportion de feuilles juvéniles sur les individus. Ces feuilles en croissance réagissent de manière plus importante aux variations climatiques et sont potentiellement plus sensibles à un pilotage de serre différent. La deuxième hypothèse suggérerait un biais éventuel lié au facteur temporel. La durée des notations plus longue dans le compartiment de référence a pu entrainer certaines erreurs. En prélevant le même numéro de feuilles sur deux plantes, l'une en début de notation et l'autre en fin de période, il est possible qu'une ou plusieurs feuilles supplémentaires se soient établies entre temps sur la dernière plante mesurée, et que ces feuilles plus jeunes, bien que portant le même numéro, aient démontré des surfaces foliaires plus faibles. En supprimant les feuilles situées en partie basse, dont la croissance varie moins, nous pouvons nous attendre à augmenter ce biais potentiel.

La figure 5, ne nous permet pas d'identifier une augmentation ou une réduction du LAI qui serait lié à cette variable temporelle. En effet, le LAI varie en fonction des plantes étudiées et non en fonction d'une durée plus ou moins longue de notations. Même si la dynamique de croissance et d'apparition de nouvelles feuilles existe, elle ne semble pas avoir engendré un biais dans les notations de cette étude. De plus en regardant la répartition des observations non effeuillées entre les plantes des deux modalités, on peut s'apercevoir que les données mesurées dans le compartiment de référence montrent des LAI beaucoup moins étendus autour de la valeur médiane de l'échantillon que ceux du compartiment autonome (Cf. Figure 4).

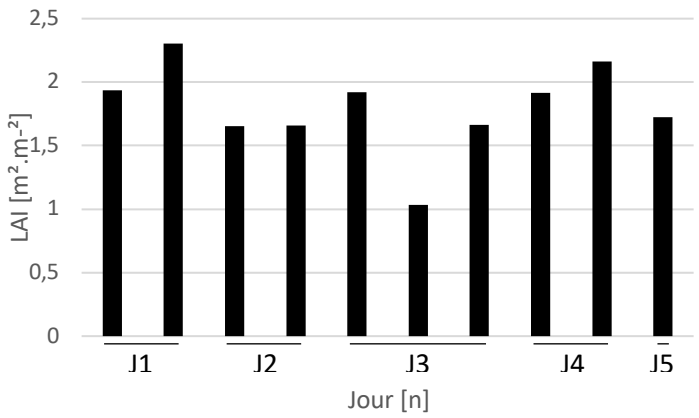



*Figure 5 : Valeurs des indices de surface foliaire des plantes du compartiment de référence réparties dans un ordre chronologique du premier jour (J1) jusqu'à la fin des notations de ce compartiment (J5). [Source personnelle]*

Nous avons aussi cherché à savoir si la différence structurelle des deux compartiments de l'étude ne pouvait pas être à l'origine des écarts entre les deux modalités. Le compartiment de référence possède en effet des chapelles plus larges mais une densité et un nombre de rangs égal. Les inter-rangs y sont ainsi plus important (Cf. 3.2.1 Zone d'étude) et l'espacement entre les plants y est légèrement réduit. Cet écart de 2 centimètres par rapport à l'autre compartiment a été jugé négligeable. La différence plus importante dans les inter-rangs, de 18 centimètres exactement, a aussi été considérée comme peu impactante.

Les résultats actuels nous permettent de remarquer un effet significatif du système de régulation climatique sur le développement végétatif des plantes étudiées. Malgré un nombre de feuilles en moyenne plus important pour les plantes du compartiment de référence, l'indice des surfaces foliaires des observations faites dans ce dernier y est plus faible que dans le compartiment représentant la modalité autonome. Ce LAI plus faible peut être la résultante d'une conduite entrainant des périodes de stress. Nous le verrons par la suite, le pilotage du système autonome établit des consignes, notamment d'aération et d'arrosage, plus régulières et lissées dans le temps alors que le pilotage de référence est basé sur des décisions qui peuvent entrainer des variations plus soudaines dans le management des équipements. La relation positive forte entre la surface foliaire et la transpiration nous laisse supposer, à partir des résultats actuels, que le système autonome semble en effet pouvoir maximiser cette dernière, en maintenant un climat où la variation des paramètres qui le constituent tend à être réduit au maximum.

### 3.3.2 Modélisation de l'indice de surface foliaire

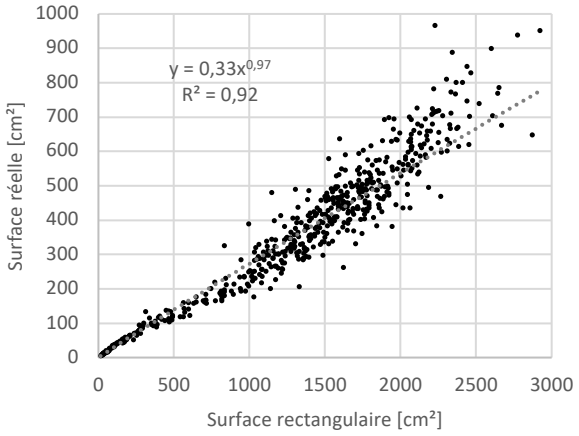



*Figure 6 : Relation puissance rencontrée entre la surface rectangulaire et la surface réelle de l'ensemble des feuilles prélevées durant l'expérimentation. [Source personnelle]*

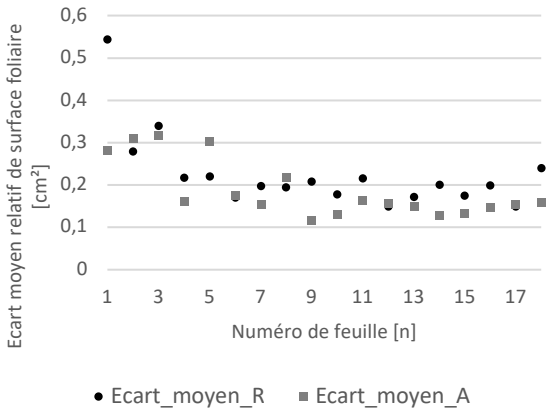



*Figure 7 : Écarts moyens relatifs entre les surfaces foliaires des feuilles portant le même numéro pour l'ensemble des plantes des deux compartiments. [Source personnelle]*

En confrontant les surfaces rectangulaires de chaque feuille avec leur surface réelle, nous avons pu trouver une relation croissante forte entre ces deux variables. Après régression linéaire et régression puissance, il nous a été possible de trouver une équation (Cf. Figure 6) nous permettant d'estimer avec précision la surface foliaire réelle de chaque feuille avec la simple mesure de leur largeur et de leur longueur. En intégrant par la suite les données prélevées sur les plantes de l'autre variété étudiée, nous avons pu remarquer que cette relation n'était pas dépendante de la variété car l'équation de sa régression linéaire était presque identique à celle observée sur les plantes de la variété, et que la puissance d'estimation restait bonne (RRMSE = 18%, $R^2$ = 0,98). Dans le but de créer l'outil de modélisation le plus générique possible, nous avons décidé de continuer à travailler avec cette relation pour la suite de l'expérimentation.

Il est important de remarquer toutefois que cette relation est moins forte sur les feuilles plus grandes où la variation d'un individu à un autre est plus importante. La qualité de prédiction sur ces feuilles-là est donc réduite. En effet, en comparant les écarts-types et les écarts moyen de chaque feuille pour les deux modalités, il est possible de voir que ceux-ci augmentent en fonction de l'augmentation du numéro de feuille. Les surfaces plus grandes des feuilles plus âgées sont à l'origine de ces écarts plus important. Aussi, au fur et à mesure que les feuilles se développent, celles-ci vont avoir tendance à occuper plus l'espace définit par leur rectangle.

En revanche, en étudiant l'écart moyen relatif, il est possible de se rendre compte que ces écarts sont en fait plus fort sur les jeunes feuilles, notamment jusqu'à la troisième feuille dont la croissance active est à l'origine de plus de variation (Cf. Figure 7). En clair, la variation apparait plus forte pour les feuilles âgées car elles sont plus grandes et qu'elles adoptent une morphologie différente mais en proportion par rapport à la moyenne des surfaces de chaque feuille, c'est sur les feuilles juvéniles que l'on observe le plus de variabilité.

La recherche d'une feuille représentative n'a pas été facilitée par cette variabilité. Face à ces premières observations, nous avons constaté que la recherche d'une feuille représentative de la surface foliaire moyenne de chaque plante n'était pas le meilleur angle d'approche. La recherche de cette feuille par l'étude des relations entre le numéro de feuille et la surface foliaire relative nous a permis d'identifier la feuille la plus représentative de la surface foliaire moyenne pour chaque plante, comme la feuille n°12 pour l'ensemble des plantes regroupées (Cf. Tableau 3). Lorsque l'on étudie indépendamment les deux modalités, le même numéro de feuille est jugé comme étant le plus représentatif de la surface moyenne des plantes du compartiment de référence alors que c'est la feuille n°11 qui apparait comme la plus représentative dans le compartiment autonome. Les mêmes observations ont été faites dans les procédures visant à relier la surface foliaire relative à un numéro de feuille par le biais de la hauteur de feuille relative. En estimant le LAI à partir de chaque feuille (Cf. Équation 6) et en comparant ces estimations aux LAI réels, nous avons également pu observer les feuilles présentant les écarts les plus faibles et les meilleurs coefficients de détermination. Les feuilles n°7 (RRMSE = 18%, $R^2$ = 0,17), n°9 (RRMSE = 18%, $R^2$ = 0,33) et n°13 (RRMSE = 14%, $R^2$ = 0,67) sont les feuilles qui présentent le moins d'écart par rapport à la réalité pour l'ensemble des plantes étudiées, pour la modalité de référence et pour la modalité autonome respectivement. Les estimations présentant les meilleurs coefficients de détermination sont celles réalisée à partir de la feuille n°15 (RRMSE = 22%, $R^2$ = 0,55) pour le compartiment de référence, et avec la feuille n°12 pour le compartiment autonome (RRMSE = 24%, $R^2$ = 0,67) et pour l'ensemble des plantes regroupées (RRMSE = 24%, $R^2$ = 0,67).

*Tableau 3 : Résumé des numéros de feuilles représentatives et de leur qualité de prédiction traduite pour les trois méthodes de détection (RLA = recherche de la feuille la plus représentative de la surface foliaire moyenne ; RRMSE = recherche de la feuille démontrant le moins d'écarts entre les valeurs réelles et le LAI estimé à partir de sa surface ; $R^2$ = recherche de la feuille dégageant l'estimation du LAI à l'origine du meilleur $R^2$ en comparaison avec les données réelles). [Source personnelle]*

| **Méthode de détection** | **Groupe de plantes** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Référence** | | | **Autonome** | | | **Ensemble des plantes** | | |
| | **N°** | **RRMSE** | **$R^2$** | **N°** | **RRMSE** | **$R^2$** | **N°** | **RRMSE** | **$R^2$** |
| RLA | 12 | 24% | 0.47 | 11 | 17% | 0.32 | 12 | 24% | 0.66 |
| RRMSE | 9 | 18% | 0.33 | 13 | 14% | 0.67 | 7 | 18% | 0.17 |
| $R^2$ | 15 | 22% | 0.55 | 12 | 24% | 0.67 | 12 | 24% | 0.66 |

La feuille n°12 semble donc être la feuille la plus intéressante pour développer un outil de modélisation de l'indice de surface foliaire. Malgré tout, sa qualité de prédiction ne s'est pas révélée être suffisante et nous avons dû trouver un moyen d'améliorer notre capacité d'estimation. Nous avons ainsi associé les estimations de plusieurs feuilles par le biais de combinaisons simple et d'une analyse de régression linéaire multiple.

La création d'un générateur de combinaisons calculant les moyennes de toutes les combinaisons simples possibles, soit sans répétitions ni arrangements, nous a permis d'obtenir de nouvelles données estimées. En comparant celles-ci aux valeurs réelles, nous

avons pu en identifier les plus pertinentes. Pour cette partie, nous avons décidé de définir le coefficient de détermination comme indicateur de pertinence car celui-ci nous a permis d'identifier les estimations ayant la dynamique la plus proche de celle de la variation du LAI en fonction des différentes plantes.

Déjà avec des combinaisons de deux feuilles, nous avons pu observer une nette amélioration de la modélisation en visualisant les deux modalités séparément (Cf. Figure 8 & 9). Cette amélioration s'est montrée encore plus forte dans la modalité du compartiment autonome. En effet, malgré une importante variation des surfaces foliaires générale à toutes les plantes étudiées, la combinaison de deux feuilles permet pour les plantes du compartiment autonome, de rencontrer de meilleures variables de modélisation. Dans le compartiment de référence, le groupement de deux feuilles n'est pas suffisant pour y améliorer la prédiction de ses indices foliaires. Il semblerait donc que la variation de ses surfaces foliaires, en plus d'y être plus importante que dans l'autre modalité, ne puisse pas décrire une tendance proche de celle des valeurs observées.

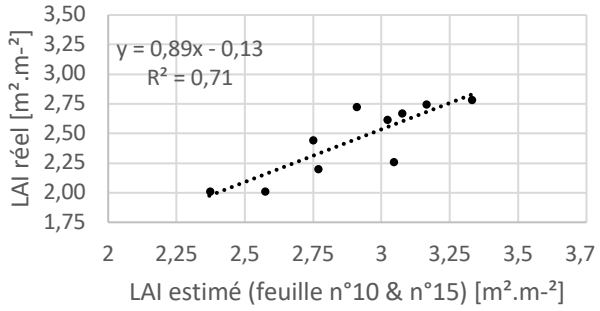



*Figure 8 : Relation entre la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel dans le compartiment de référence. [Source personnelle]*

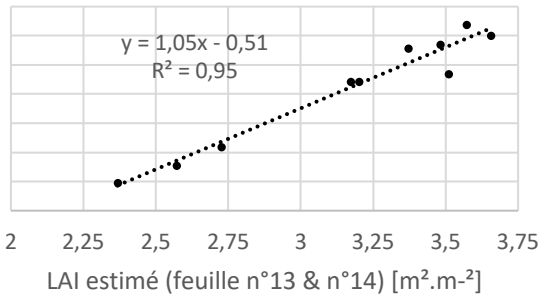



*Figure 9 : Relation entre la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel dans le compartiment autonome. [Source personnelle]*

L'élaboration d'un outil générique capable d'être mobilisé dans les deux compartiments n'a donc pas été facilité par cette observation. Nous avons ainsi augmenté le nombre de feuilles impliquées dans ces combinaisons jusqu'à atteindre un coefficient de détermination correct supérieur à 0,85.

Le générateur de combinaisons nous a permis d'identifier qu'une combinaison de quatre feuilles nous amenait au meilleur compromis entre rapidité des mesures et qualité d'estimation. En effet, la moyenne des feuilles n°3 ou n°4 avec les feuilles n°15, n°16 et n°17 offre une bonne estimation du LAI réel sur l'ensemble des plantes étudiées avec un R² et une RRMSE après régression linéaire identique de 0,88 et de 6% respectivement. L'analyse de régression linéaire multiple menée en parallèle a elle aussi définit la combinaison précédente avec la feuille n°3, comme étant la meilleure parmi toutes celles comprenant un nombre de quatre feuilles. Elle dégage ainsi un R² de 0,90, un R² ajusté de 0,88, et une RRMSE finale de 5%. Cette cohérence entre les deux méthodes d'analyse nous a incité à choisir la méthode d'estimation la plus simple issu de l'analyse de régression linéaire multiple. Le modèle final est résumé ci-dessous :

$$Modèle\ LAI = (LAI_{est\ 3} * 0.569 + LAI_{est\ 15} * 0.361 + LAI_{est\ 16} * 0.309 + LAI_{est\ 17} * 0.309) - 0.76 \quad (11)$$

Avec $LAI_{est\ i}$, correspondant à la surface foliaire estimé de la feuille n°$i$, à partir de la relation entre la surface rectangulaire et la surface réelle des feuilles évoqué précédemment (Cf. Equation 6).

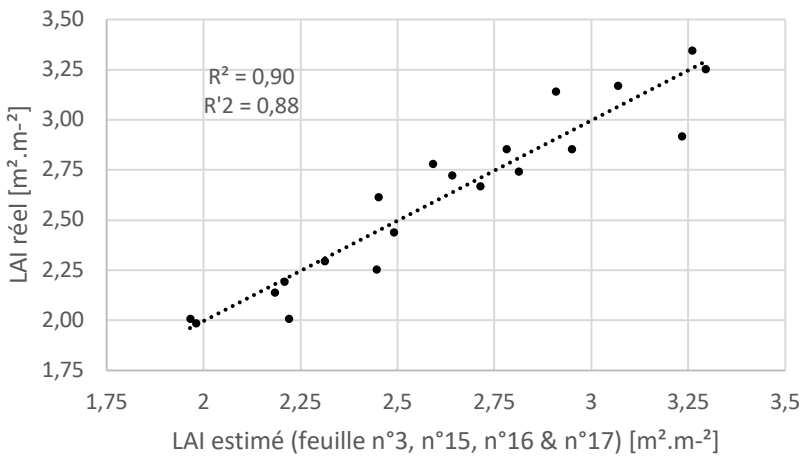



*Figure 10 : Relation entre la régression linéaire multiple de la meilleure combinaison de feuilles pour estimer le LAI et le LAI réel pour l'ensemble des plantes étudiées. [Source personnelle]*

Il semblerait que la mise en relation entre des feuilles juvéniles et des feuilles beaucoup plus âgées permette de corriger la variabilité rencontrée sur le terrain et de créer un modèle robuste adapté à des conditions réelles (Cf. Figure 10). Les feuilles n°15,16 et 17, permettent de fixer une base solide dans la définition de la surface foliaire dont la qualité de prédiction est augmentée par le biais de la feuille n°3, traduisant de son côté la dynamique de croissance de la plante. La prise de mesure des longueurs et largeurs des feuilles concernées par ce modèle se réalise en moins de 10 minutes. Le système de mesures destructif classique demande quant à lui, entre 1h30 et 1h40 de prise de données.

Le modèle, utilisé sur les 5 plantes de la variété Provine® ne nous a pas permis de montrer une bonne qualité de prédiction et il semble que le comportement de cette dernière variété soit différent.

### 3.4 CONCLUSION

L'augmentation de la surface foliaire dans la modalité de régulation climatique autonome est le premier signal d'une potentielle hausse de la transpiration. Les feuilles sont la source de transpiration la plus importante des plantes et nous avons pu voir précédemment qu'en augmenter le nombre et la surface induisait une activité transpiratoire plus importante. Même si nous pouvons suggérer que le pilotage du climat semble favorable à la culture disposée dans le compartiment autonome, une analyse plus approfondie, notamment des variables climatiques, nous permettra au travers de la deuxième expérimentation, de formuler des interprétations plus précises. Aussi, il semble important de ne pas prendre en compte cet indice de surface foliaire uniquement, car, comme nous avons pu l'évoquer précédemment, le développement végétatif ne peut pas être considéré sans avoir été confronté au développement génératif.

Aussi, les données récoltées durant cette première expérimentation nous ont permis de développer un outil de monitoring capable d'estimer l'indice de surface foliaire des plantes de la variété la plus cultivé dans les serres de Red Sun Farms®. A partir de simples mesures de longueurs et de largeurs, les équipes de l'entreprise seront donc désormais capables d'estimer rapidement, précisément et sans destruction le profil végétatif des plantes. La prise de données pour mesurer le LAI d'une plante peut facilement se faire en 10 minutes, réduisant la durée de notations par un facteur 10 par rapport à une mesure classique. Ce modèle a donc pu être employé durant la deuxième expérimentation.

# 4 ANALYSE DE L'INFLUENCE DU SYSTEME AUTONOME SUR LA CONSOMMATION EN EAU ET LA PRODUCTIVITE, ET MODELISATION DE LA TRANSPIRATION

## 4.1 INTRODUCTION

Même si comme nous avons pu l'introduire précédemment, la relation entre la transpiration et le rendement n'est pas complètement comprise et théorisée, elle l'influence fortement et joue un rôle important sur les paramètres de croissance. Il est difficile de définir un niveau de transpiration optimal à l'heure actuelle mais il est tout à fait sûr que la connaissance voire l'adaptation de ce paramètre présente des intérêts certains (Bontsema et al. 2007).

Encore à l'heure actuelle, la gestion de l'arrosage n'est majoritairement pas basée sur les besoins exacts des cultures mais plus généralement sur les connaissances et l'expérience du chef de culture (Carmassi et al. 2013). Ce constat nous permet donc de comprendre qu'en fonction de l'expertise de ce dernier, la qualité de l'arrosage peut donc fortement varier. Ainsi, une gestion approximative de l'arrosage peut conduire à des apports excessifs, entrainant des pertes en eau importantes, une pollution de l'environnement, des dégâts racinaires ou au contraire, à des apports trop faibles, réduisant ainsi les rendements et favorisant des phénotypes de plantes plus chétifs (Carmassi et al. 2013; Joe Acquah et al. 2018). Aussi à l'heure actuelle, le secteur de l'agriculture est à l'origine de 70% de la consommation des ressources en eau douce dans le monde (Rahimikhoob, Sohrabi, & Delshad 2020). Élément essentiel à toutes activités agronomiques, l'eau est en effet devenue une ressource rare qu'il faut savoir employer à bon escient. C'est notamment dans ce contexte que l'agriculture de précision se développe avec pour principal challenge, l'amélioration de l'efficience de l'eau (Gong et al. 2021). Un pilotage de l'irrigation basé sur des connaissances scientifiques est nécessaire pour répondre à ce défi.

La transpiration utilise quasiment toute l'eau consommée par la plante. Être capable de mesurer son comportement et son évolution, c'est être capable d'optimiser au mieux l'irrigation, notamment dans le cas d'une culture hors-sol où seul l'arrosage est à l'origine des apports en eau (Rivera-Zamarripa et al. 2013). En mesurant ou en estimant la transpiration, la précision des apports est augmentée, les excès ou les manques sont minimisés (Joe Acquah et al. 2018; Martínez-Ruiz et al. 2012; Rahimikhoob, Sohrabi, & Delshad 2020; Yan et al. 2020). Connaitre la transpiration c'est aussi être capable d'anticiper des situations extrêmes où celle-ci atteint des valeurs maximales ou minimales, comprendre les influences de la régulation climatique sur son évolution et tenter de mieux appréhender son lien avec la consommation en eau (Bontsema et al. 2007). La transpiration peut aussi être un bon indicateur de l'état physiologique de la plante. La réduction de la transpiration peut ainsi indiquer des problèmes dans l'état hydrique d'une culture et permettre l'identification d'un ou de plusieurs facteurs de stress (Carmassi et al. 2013).

Des outils et des équipements permettent de mesurer la transpiration des plantes. Parmi les équipements les plus connus, les lysimètres de drainage et les lysimètres balances (traduit du terme *weigh lysimeter*), permettent de suivre l'évolution de la transpiration ou de l'évapotranspiration des plantes. Les lysimètres de drainage permettent la mesure des eaux de drainage d'une parcelle élémentaire et ainsi, par comparaison avec le volume apporté par arrosage, donnent une information sur la consommation en eau (Nikolaou et al. 2019). Les lysimètres balances, sont des dispositifs électroniques permettant le suivi régulier de la masse d'une micro-parcelle voire d'un pot (Nikolaou et al. 2019; Uddin et al. 2014). Les mesures faites avec ce genre d'appareils sont d'ailleurs jusqu'à ce jour largement utilisées pour valider des modèles de transpiration ou d'autres équipements de mesures (Gong et al. 2017; 2019; 2021; Uddin et al. 2014; Rivera-Zamarripa et al. 2013).

Depuis quelques années les capteurs de flux de sèves permettent également de mesurer la transpiration. Une relation considérée comme égale existe entre le débit de sève et la transpiration. Un capteur de flux de sève se compose d'un élément chauffant, d'un thermocouple central, de deux paires de thermocouples différentiels et d'un fluxmètre : L'élément chauffant, une feuille de silicone souple comportant une résistance en constantan, délivre une chaleur constante au niveau de la tige de la plante étudiée. Les deux thermocouples différentiels sont situés en amont et en aval de ce corps chauffant. Un thermocouple est inséré sous le corps chauffant au centre de ce dernier afin de mesurer la chaleur stockée dans la section de la tige. Le fluxmètre est constitué d'une suite d'une douzaine de thermocouples différentiels, dont les soudures sont positionnées de part et d'autre d'une feuille de silicone. Ainsi, cet élément mesure une différence moyenne de température entre chaque face de la feuille de silicone, et l'intègre à l'ensemble de sa surface. A partir du différentiel de température entre l'amont et l'aval de l'élément, et en intégrant ses paramètres de puissance, la chaleur massique de la sève brute et les flux de chaleur par conduction de la plante, il est possible d'obtenir le débit du flux de sève (Charreyron 2011; Dynamax 2007). Ce dispositif est compact, facile à installer et à déplacer. Il est d'ailleurs de plus en plus utilisé comme source de mesures réelles de la transpiration dans de nombreuses expérimentations (Gong et al. 2017; 2019; 2021; Uddin et al. 2014; Rivera-Zamarripa et al. 2013).

Globalement ces équipements représentent des investissements importants, demandent une maintenance assidue et une présence très régulière (Gong et al. 2021). C'est face à ces constats et à l'importance de connaitre l'évolution de la transpiration que d'importants travaux de recherches ont été menés ces dernières années pour tenter de pouvoir prédire et estimer au mieux ce paramètre.

A ce jour, le modèle basé sur l'équation de Penman-Monteith fait toujours référence sur la définition du flux de chaleur latent (Gong et al. 2017; Monteith 1965) :

$$LE = \lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho C_p DPV}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \tag{12}$$

Avec $LE$, le flux de chaleur latente (W.m-²), $\lambda$, la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J.kg-¹), $ET$, le débit d'évapotranspiration (mm.h-¹), Δ, la pente de la courbe de saturation de vapeur (kPa.°K-¹), $Rn$, le rayonnement net (W.m-²), $G$, le flux de chaleur du sol (W.m-²), $C_p$, la chaleur massique de l'air, $\rho$, la densité de l'air (Kg.m-³), $DPV$, le déficit pression vapeur (kPa), $r_a$, la résistance aérodynamique (s.m-¹), $r_c$, la résistance de canopée ou de surface (s.m-¹) et $\gamma$, la constante psychrométrique (kPa.°K-¹).

Le flux de chaleur latent exprime l'activité transpiratoire sous une unité énergétique, unité qui ne semble pas intuitive lorsque l'on parle de transpiration. Néanmoins ce flux a l'avantage de pouvoir être converti en débit sous n'importe quelle fréquence temporelle grâce à la chaleur latente de vaporisation de l'eau (Reis & Ribeiro 2020) :

$$\lambda = 10^3(2500 - 2{,}37.T) \tag{13}$$

Avec $\lambda$, la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J.kg-¹) et $T$, la température de l'air (°C).

Ainsi, si le flux de chaleur latent est obtenu à partir de valeurs d'entrées mesurées toutes les heures, la transpiration peut être calculée de la sorte (Reis & Ribeiro 2020) :

$$ET = 3600 * \frac{LE}{\lambda} \tag{14}$$

Autant le calcul ou la mesure d'un grand nombre de paramètres de l'équation du flux de chaleur latente ne pose pas de problème, notamment concernant le rayonnement net, la pente de la courbe de saturation de vapeur, le flux de chaleur du sol, considéré comme nul en culture hors-sol sous serre, le déficit pression vapeur, la densité et la chaleur massique de l'air ou la constante psychrométrique, autant les paramètres de résistances aérodynamiques et de surfaces peuvent être calculés très différemment, surtout dans un contexte de serre où certains paramètres sont différents.

En plus de vérifier si le système de régulation autonome étudié au travers de ce programme induit bien des comportements de transpiration différents sur la culture de tomates établie, nous chercherons également à observer des différences sur son rendement. Les données collectées pour tester l'hypothèse concernant la transpiration permettront également de valider un modèle basé sur l'équation de Penman-Monteith (Cf. Equation 12) en sélectionnant l'expression des paramètres la plus adaptée à notre contexte et en comparant ces estimations avec celles de quatre autres modèles.

## 4.2 MATERIEL ET METHODES

### 4.2.1 Zone d'étude

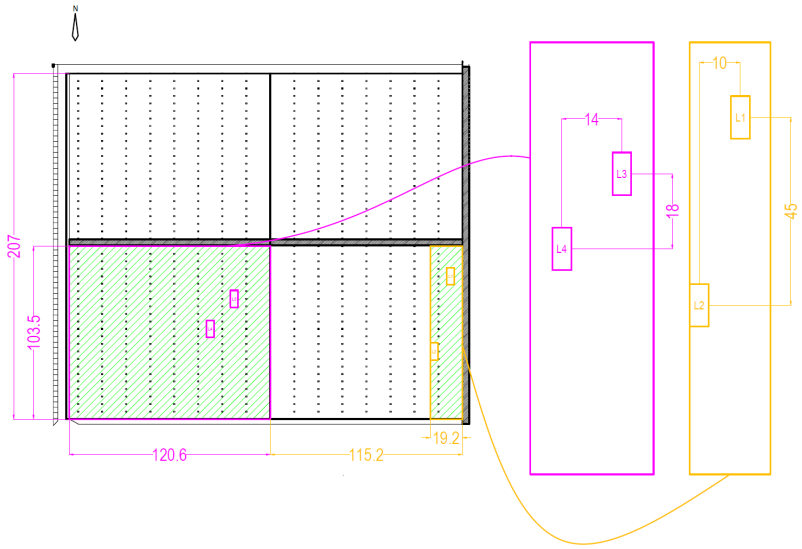



*Figure 11 : Plan de la zone d'étude de la consommation en eau*

*Avec le compartiment de référence au sud-est et le compartiment autonome au sud-ouest. Les hachures vertes correspondent aux zones cultivées avec la variété Merlice®. La zone d'études des plantes du compartiment de référence est symbolisée par le rectangle jaune et celle du compartiment autonome par le rectangle magenta. La position des lysimètres est symbolisé par les rectangles L1 et L2 dans le compartiment de référence, que nous avons aussi appelé R1 et R2, et par les rectangles L3 et L4 dans le compartiment autonome, que nous avons aussi appelé A1 et A2. Les unités sont en mètres. [Source personnelle]*

Pour cette seconde expérimentation, la modalité témoin a été étudiée dans un compartiment identique au compartiment autonome sur le plan structurel. Les informations concernant les caractéristiques des deux compartiments sont celles indiquées dans la description du compartiment autonome de la partie relative à la méthodologie de la première expérimentation (Cf. 4.2.1 Zone d'étude). Les deux compartiments sont accolés dans un sens d'orientation est-ouest, sont séparés par une paroi et sont parfaitement alignés dans l'axe d'orientation nord-sud. Ils possèdent une largeur et une longueur identique, mise à part le fait que le compartiment autonome dispose d'un *side-bay*, un type d'extension de chapelle reliant le faitage au sol, nécessaire sur les extrémités de serres donnant sur l'extérieur. Le compartiment de référence s'étale donc sur une surface légèrement plus faible de 11 923 m².

La variété Merlice®, prise en compte dans cette étude, y est cultivée et récoltée depuis le 20/09/2020, et le 23/11/2020, respectivement. Celle-ci n'est présente que dans la première chapelle et sur les trois premiers rangs de la deuxième chapelle du compartiment de référence, dans la partie sud de ce dernier. Cela représente une surface d'environ 1987 m² et, avec une densité de 3,05 plants par mètre carré, un nombre de plantes supérieur à 6000. Les consignes de ce compartiment et ses caractéristiques techniques, mis à part sur la structure de serre qui est la même que celle du compartiment autonome, sont celles décrivant le compartiment de référence de la première expérimentation (Cf. 3.2.1 Zone d'étude). Comme énoncé précédemment, la partie du compartiment autonome concernée dans cette seconde expérimentation, soit la plus au sud, et elle entièrement cultivée avec la variété Merlice®. La visualisation de la zone d'étude est résumée par la figure 11.

### 4.2.2 Dispositif expérimental

La puissance du dispositif et la qualité des données mesurées ont été limitées par des contraintes techniques qu'il est utile de présenter ici. Initialement nous devions, en plus des mesures de lysimètres de drainage quantifiant l'eau absorbée par les plantes, réaliser des mesures de flux de sève d'une ou plusieurs plantes évoluant sur les lysimètres, via des capteurs de flux de sève. L'idée était de maximiser la prise d'information, de valider la bonne calibration des capteurs de flux de sève en vérifiant la cohérence de leurs mesures par rapport à celles des lysimètres, et d'obtenir des informations à une fréquence élevée (15 minutes). Ce dernier point nous aurait permis de valider un modèle de transpiration travaillant sur une même échelle de temps. Aussi, la précision de la modélisation aurait pu être augmentée par ces mesures de flux de sève car ces capteurs sont disposés plante par plante. L'information donnée étant spécifique à une plante et non pas à un groupe de plantes comme avec les lysimètres, nous pouvions nous attendre à des estimations plus précises, notamment par le fait que le calcul du LAI, nécessaire pour estimer la transpiration de chaque plante, aurait été spécifique à cette dernière.

Le coût relativement élevé de ces capteurs nous a empêché de pouvoir en acheter une quantité importante. Nous avons dû limiter notre commande à quatre capteurs. Cette limitation est à l'origine du faible nombre de répétitions dans cette seconde expérimentation. Le facteur de régulation climatique est donc encore une fois ici représenté par deux modalités mais les mesures réalisées dans ces compartiments respectifs n'y sont physiquement répétées que 2 fois. Chacune de ces deux parcelles élémentaires par modalité est représenté par un lysimètre supportant un groupe de douze plantes. Pour définir le positionnement de ces lysimètres, nous avons tenté de trouver des groupes de 12 plantes homogènes et représentatifs de l'ensemble de la production, relativement répartis dans l'espace tout en considérant la future installation des capteurs de flux de sève. En effet, ces capteurs s'assemblent en paires car ils sont reliés à un dispositif d'enregistrement et d'envoi des données dont la capacité de connexion maximale se limite à deux capteurs. La liaison entre ces derniers et ce dispositif est physique et nécessite une connexion par câbles. De ce fait l'espacement entre les deux parcelles élémentaires de chaque compartiment n'a pas pu être plus important que la distance maximale permise par les câbles. Aussi, ces deux parcelles élémentaires ont forcément dû rester à proximité des rangées de poteaux entre deux chapelles afin de permettre l'installation du dispositif d'enregistrement. Enfin, à contrario des trois autres lysimètres, le lysimètre 4 du compartiment autonome était déjà installé avant l'expérimentation. L'établissement de la seconde parcelle élémentaire a donc dû se faire à proximité.

Nous avons considéré que le nombre important de plantes composant une parcelle élémentaire nous permettait de corriger quelque peu la faiblesse d'interprétation statistique du dispositif résultante du faible nombre de répétitions.

### 4.2.3 Méthodes

Après avoir identifié des groupes de plantes relativement homogènes et en cohérence avec les contraintes d'éloignement des parcelles liées au positionnement des capteurs et au lysimètre déjà présent, nous avons pu étiqueter la partie verticale de chaque plante avec un code correspondant à sa position sur le rang, à l'est ou à l'ouest, et à son numéro d'apparition sur le lysimètre du nord vers le sud. Chaque pain possédant trois plantes orientées côté est, et trois plantes orientées côté ouest, un code allant de E1 à E6, et de O1 à O6 a été attribué à chacune des plantes composant les parcelles élémentaires. Dans le système de culture actuel, les plants de tomates conduits sur fil peuvent rapidement mesurer jusqu'à quinze mètres de long. Les plantes sont couchées sur une très grande partie de leur longueur totale ce qui rend l'identification du bloc à l'origine d'une tige repérée difficile. Cet étiquetage a donc permis d'identifier rapidement les plantes disposées sur les lysimètres, en facilitant leur récolte et leur monitoring.

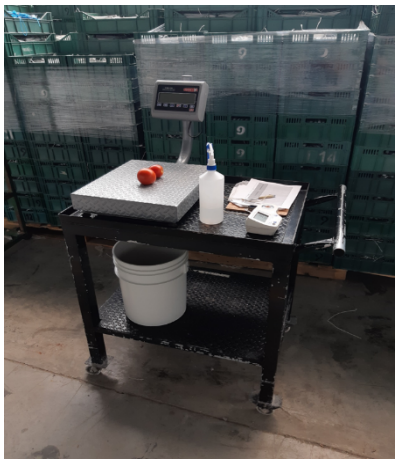


*Figure 12 : Table mobile d'analyse de qualité des fruits et de rendement. [Source personnelle]*

*Figure 13 : Installation des lysimètres de drainage supportant deux pains de culture de six plantes chacun. [Source personnelle]*

Les lysimètres R1, R2 et A1 ont été installés le 9 juillet 2021 dans le compartiment de référence pour les deux premiers et dans la modalité autonome pour le troisième, où le lysimètre A2 était déjà installé depuis la plantation des plantes du compartiment. L'installation des lysimètres se fait normalement en début de la culture mais ces derniers ont pu être placés dans la zone d'étude sans encombre. Ces lysimètres de drainage se compose d'un support incliné et d'une tablette métallique dont l'une des extrémités dispose d'un point de drainage. Les deux pains de culture sont disposés sur cette tablette elle-même disposée sur le support. Le dispositif permet l'évacuation de l'eau de drainage des deux pains vers un contenant placé en dessous du point de vidange de sa tablette. Un autre contenant, également au-dessous du lysimètre, permet la collecte de l'eau d'arrosage en recevant un jeu de goutteurs. Un jeu de goutteurs est un goutteur dont la sortie est une araignée de 4 tubes. Pour deux pains de culture, 3 jeux de goutteurs sont nécessaires.

Un problème d'approvisionnement des capteurs de flux de sève nous a empêché de pouvoir les utiliser durant cette étude. Nous avons attendu leur réception jusqu'à une date butoir où nous avons décidé de lancer l'expérimentation. Le début de la phase de notations de la deuxième expérimentation de ce programme a ainsi commencé le 13 juillet 2021 et s'est achevé le 13 août 2021, s'étalant ainsi sur une période de 32 jours.

#### *4.2.3.1 Méthodes : influence du facteur sur la consommation en eau et la production*

Pour évaluer l'argument principal du fournisseur de la solution de pilotage de serre autonome, la maximisation de la transpiration, et en l'absence d'outils de mesures plus précis, nous avons collecté les informations relatives à la consommation en eau des plantes via les lysimètres. Pour ce faire, la différence entre le volume du collecteur de drainage et d'arrosage de chaque lysimètre a été relevé à une fréquence fixée à 4 fois par jour et à heure régulière : 7h30,10h30, 13h00 et 15h00. La somme des données relevées à 10h30,13h00, 15h00 et 7h30 le lendemain nous a permis d'établir les mesures de consommation journalières. Cette organisation du travail est celle suivie par l'équipe supervisant l'irrigation sur le site de production. Comme ces derniers avaient besoin de continuer à visualiser les données du lysimètre 4, déjà présent avant l'expérimentation, nous avons choisi de suivre la même méthodologie de travail. En plus d'analyser la consommation des plantes, les informations concernant les apports et le drainage de chaque lysimètre ont aussi été étudiées directement. En l'absence d'un nombre de répétitions suffisant mais face à un nombre élevé de plantes par parcelle élémentaire, nous nous sommes permis de réaliser l'analyse de variance du facteur de système de régulation et du facteur de date de prélèvement sur la variable de consommation en eau. Nous avons appuyé ce traitement statistique par une analyse descriptive des données collectées.

La mesure du rendement et de la qualité des plantes disposées sur chacun des lysimètres a été réalisé 3 fois par semaine pour chacune des modalités. En effet, les équipes de travail récoltent les fruits du compartiment de référence le lundi, le mercredi et le vendredi. Du côté du compartiment autonome, cette récolte est réalisée le mardi, le jeudi et le samedi. Nous avons profité de l'expérience des équipes de travail pour réduire les biais possibles d'une récolte réalisée par un étudiant, moins habitué aux critères favorables ou défavorables à la cueillette d'un bouquet donné. L'idée était aussi de réaliser cette analyse dans les conditions de travail les plus représentatives de l'entreprise. Ainsi, à chaque récolte, les cueilleurs ont séparé les bouquets cueillis sur les plantes des lysimètres, identifiés par des rubans colorés. Une fiche d'enregistrement a été remplie à chaque récolte, indiquant le jour, le nombre de cagettes récoltées et le numéro de lysimètre correspondant et celle-ci a été placée au-dessus des cagettes relatives à cette feuille d'enregistrement. Le poids, le nombre de bouquets et les degrés Brix des premiers fruits de chaque bouquet ont ensuite été enregistrés pour chaque lysimètre. Le rendement et le nombre de bouquets ont été étudiés à une échelle de temps hebdomadaire, en sommant les 3 mesures pour chaque semaine. Le rendement surfacique par semaine a été calculé en divisant le rendement hebdomadaire de chaque lysimètre par le nombre de plants par lysimètre et en multipliant ce résultat par la densité. Le nombre de bouquets par plante par semaine a lui été calculé en divisant le nombre de bouquets hebdomadaire total par lysimètre par le nombre de plantes supportés par ces derniers. Les degrés Brix de tous les fruits étudiés pendant une semaine donnée ont été moyennés pour chaque lysimètre.

En comparant nos relevés avec les données enregistrées par le secteur de conditionnement, nous nous sommes rendu compte que nos notations n'étaient pas représentatives de la réalité. Il semblerait que l'analyse des 12 plantes limitrophes des lysimètres ne nous a pas permis d'obtenir des résultats exploitables. Les rendements surfaciques et le nombre de bouquets par plante par semaine, estimés par nos mesures, étaient pour tous les lysimètres bien en dessous de la normale et des enregistrements de la zone de conditionnement. Étudier de si petites parcelles n'a en effet pas été la meilleure approche, nous exposant à des risques plus importants, notamment sur les problèmes de qualité de travail. La casse des bouquets par les passages réguliers des travailleurs et de leurs équipements est un problème occasionnel observable dans les serres de l'entreprise. En réduisant le nombre de plantes étudiées les impacts de ce problème peuvent être amplifiés. Le relevé du nombre de bouquets par plante

nous a en effet permis d'identifier que ce nombre pouvait fortement varier d'une plante à une autre, diminuant ainsi la qualité d'interprétation des résultats.

Les rendements estimés par la zone de conditionnement ont donc également été étudiés. Ce secteur mesure en effet les volumes de rendements pour chaque variété et pour chaque compartiment à chaque récolte. Avant l'emballage des fruits, les opérateurs réceptionnant les cagettes de récolte en enregistrent le nombre et, à partir d'une mesure du poids de 5 cagettes prélevées au hasard dans chaque lot, en établissent le rendement total. En divisant ce rendement par la surface des deux compartiments concernés ici, il nous a été possible d'analyser le rendement surfacique hebdomadaire moyen de ces derniers.

En outre, l'analyse de certains paramètres climatiques, obtenus par extraction des données enregistrées par l'ordinateur pilotant les serres, nous a permis de comparer le fonctionnement des deux modalités. Nous avons principalement interprété les données de température, d'humidité et d'aération. Le déficit pression vapeur a également été pris en compte dans cette analyse en le calculant grâce à l'équation suivante :

$$DPV = e_{sat}(T) - e_a \tag{15}$$

Avec $DPV$, le déficit de pression vapeur (kPa), $e_{sat}(T)$, la pression de vapeur saturante à une température donnée (kPa) expliquée dans l'équation 16 (Allen et al. 1998), et $e_a$, la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant (kPa) expliquée dans l'équation 17 (Allen et al. 1998) :

$$e_{sat}(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17{,}27.T}{T + 237.3}\right) \tag{16}$$

$$e_a = \frac{HR.\, e_{sat}(T)}{100} \tag{17}$$

Ne provenant que d'un capteur par compartiment, ces données n'ont pas pu être analysées statistiquement mais uniquement par visualisation de données et par lecture de graphique. Ces données ont été prélevées durant toute l'expérimentation au format horaire. Le grand nombre de données collectées, ne facilitant pas leur lecture en tant que tel, a été utilisé pour créer deux valeurs moyennes pour chaque jour de l'étude : une moyenne journalière nocturne, ne prenant en compte que les valeurs prélevées entre minuit et 7 heures du matin inclus, et entre 21 heures et 23 heures inclus, ainsi qu'une moyenne pour la période de jour, établie entre 8 heures et 20 heures inclus.

#### *4.2.3.2 Méthodes : modélisation de la transpiration*

En parallèle de l'étude du facteur de régulation climatique, le prélèvement des données de consommation d'eau a servi de valeur de référence dans le processus de validation d'un outil de modélisation. Cet outil est un tableur automatisé fonctionnant sur la base de deux modèles d'estimation jugés comme représentatifs du panel disponible dans la littérature scientifique. Le premier modèle est le modèle basé sur l'équation de Penman-Monteith, décrit par l'équation 12 de ce mémoire. Les équations définissant les deux modèles étudiés sont disponibles ci-dessous (Gong et al. 2017; Villarreal-Guerrero et al. 2012) :

$Modèle\ 1$

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho C_p DPV}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \tag{18}$$

$Modèle\ 2$ $$\lambda ET = R_n - h(T_a - T_f) \quad (19)$$

Les paramètres du modèle 1 et leurs unités ont été décrit dans l'introduction de ce chapitre (Cf. 4.1 Introduction). Les paramètres du modèle 2 regroupent, $R_n$, le rayonnement net (W.m-²), $h$, le coefficient de transfert de chaleur par convection (W.m-².°C-¹), $T_a$, la température de l'air (°C) et $T_f$, la température de feuille (°C).

L'ensemble des paramètres composant les modèles utilisés est décrit en annexe 4. Les fonctions de calcul de ces paramètres ont été intégré au fichier informatisé. L'ensemble des valeurs d'entrée nécessaires à l'établissement de ces paramètres sont : la température (°C), l'hygrométrie (%), le fonctionnement de la ventilation (%) et le niveau d'ouverture des ouvrants d'aération (%) pour chacun des compartiments respectivement. Le rayonnement solaire (W.m-²), la température (°C) et la vitesse de vent extérieure (m.s-¹), la longueur et la hauteur maximale d'ouverture des ouvrants (m) ont également servi de valeurs d'entrées, soit directement pour établir les paramètres des différents modèles, soit dans le calcul de sous modèles, notamment d'un sous modèle de température de feuille (Cf. Annexe 5) et d'un sous modèle de vitesse de vent extérieure.

L'ensemble de ces variables d'entrées ont été enregistrés par deux capteurs, disposés respectivement dans le compartiment autonome et le compartiment de référence, et enregistrant les données toutes les cinq minutes dans le système de l'ordinateur climatique permettant le contrôle des serres. Ayant défini une échelle temporelle de modélisation horaires, les 12 données enregistrées chaque heure et pour chaque variable ont été moyennées.

L'information concernant l'indice de surface foliaire (m².m-²) a elle aussi servi de valeur d'entrée pour le premier modèle. Le modèle d'estimation de cet indice, développé dans la partie précédente de ce rapport, a été utilisé pour le calculer. Les mesures de longueur et de largeur des feuilles prisent en compte par cet outil de modélisation, ont également permis le calcul de la dimension caractéristique d'une feuille, $dc$ (m), paramètre pris en compte par les deux modèles est décrit dans l'annexe 4. Les mesures relatives à ces indices ont été réalisées la semaine 29, 30 et 31. La première semaine, l'estimation du LAI a été réalisé juste après le début des mesures de consommation en eau et avant l'effeuillage. Ce dernier n'avait d'ailleurs pas pu être réalisé récemment. Les deux autres mesures ont été réalisées après les effeuillages de chaque compartiment, généralement effectués le lundi ou le mardi de chaque semaine. L'étêtage des plants vers la fin de la semaine 32, habituellement réalisés en fin de cycles, ne nous a pas permis de réaliser plus de mesures. Pour évaluer cet indice, les plantes E2, E5, O2 et O5 de chaque lysimètre ont été mesurées.

Le problème d'approvisionnement des capteurs nous a empêché de comparer nos valeurs estimées à une fréquence horaire avec des valeurs réelles. Ces données de modélisation ont donc été sommées pour chaque jour afin de mesurer leur proximité avec la réalité. Leur qualité de prédiction a encore une fois été appréhendée via leur coefficient de détermination et leur RRMSE. Après cette première visualisation, une phase de calibration a été réalisée. Le processus d'ajustement des paramètres a surtout consisté à modifier les fonctions à l'origine de certains paramètres en croisant des sources bibliographiques différentes et en utilisant des sous modèles. Les coefficients de détermination et la RRMSE ont été à nouveau calculés après cette étape.

L'idée de travailler avec deux modèles était de faire une première évaluation des possibilités d'estimation de la transpiration d'une culture de tomates sous serre en comparant les résultats

d'un modèle définit comme complexe à ceux d'un modèle plus simple. Le raisonnement à l'origine de cet aspect du programme expérimental chez Red Sun Farms® était avant tout de valoriser au mieux les mesures faites sur le terrain. Les résultats obtenus ont principalement servi de première esquisse de travail, permettant à l'entreprise d'appréhender les possibilités d'amélioration permises par de tels outils, et les axes de travail à suivre ou à optimiser pour entreprendre une démarche de développement plus importante.

## 4.3 RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.3.1 Influence du facteur de régulation climatique sur la consommation en eau et la production

L'analyse de la consommation journalière des lysimètres de chaque compartiment nous a permis d'observer que celle-ci y était bien plus importante dans la modalité de régulation climatique autonome. Ces consommations, très similaires entre les deux répétitions de chaque compartiment nous invite à supposer que cette plus forte consommation en eau et bel et bien dû au système de pilotage différent.

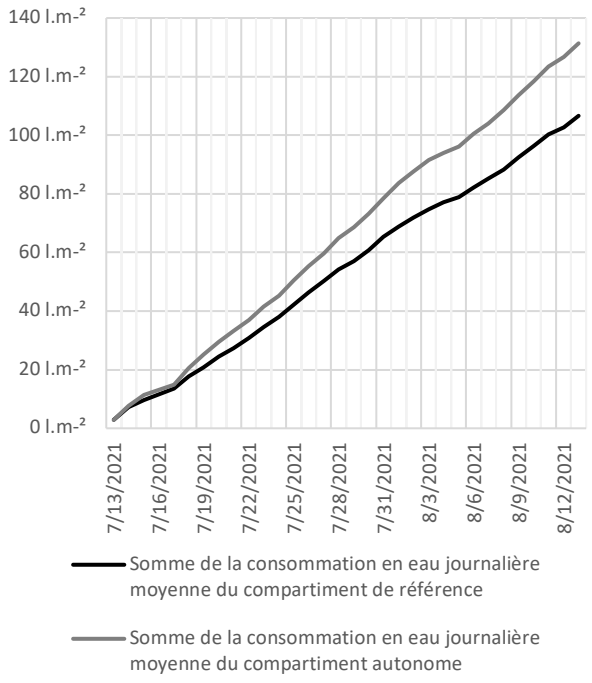



*Figure 14 : Volume de consommation cumulé en litres par mètre carré durant la période d'expérimentation entre le compartiment de référence (moyenne des lysimètres R1 et R2) et le compartiment autonome (moyenne des lysimètres A1 et A2). [Source personnelle]*

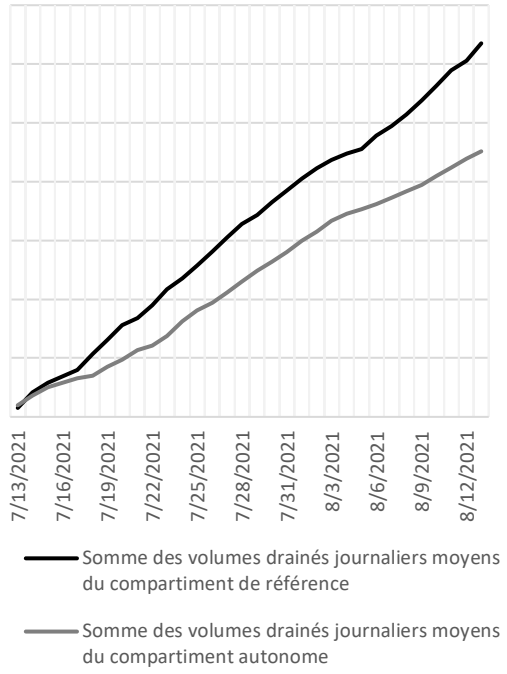



*Figure 15 : Volume de drainage cumulé en litres par mètre carré durant la période d'expérimentation entre le compartiment de référence (moyenne des lysimètres R1 et R2) et le compartiment autonome (moyenne des lysimètres A1 et A2). [Source personnelle]*

La figure 14, traduit la somme de la consommation en eau journalière de chaque lysimètre sur l'ensemble de jours de l'expérimentation. Malgré quelques différences entre les deux lysimètres de chaque répétition, la tendance globale d'une plus forte consommation en eau du compartiment autonome se distingue clairement. Au dernier jour de l'étude, l'écart de la consommation cumulée atteint une moyenne de 25 litres par mètre carré, avec une valeur de 131,36 litres par mètre carré consommé au total dans le compartiment autonome, pour 106,63 dans le compartiment de référence. En réalisant une analyse de variance à deux facteurs avec les données de consommation en eau observées sur chaque lysimètre, nous pouvons

confirmer cette différence de consommation en eau, influencée par la date de prélèvement d'une part, à l'origine des différences observées sur les deux lysimètres du compartiment autonome, mais aussi par le système de régulation climatique. Dans ce dernier, les plantes des deux lysimètres y consomment significativement moins d'eau que celles des deux autres, placés dans le compartiment autonome (Cf. Tableau 4).

*Tableau 4 : Résultats de l'analyse de variance du facteur de temps et du numéro de lysimètre sur la variable de consommation en eau avec établissement de groupes de significativité par test de Tukey HSD. [Source personnelle]*

| Modalité | Consommation en eau surfacique journalière | | |
|---|---|---|---|
| | Moyenne [$l.m^{-2}.j^{-1}$] | Groupe de significativité | p-valeur |
| Autonome | 4,24 | a | 2,2.10-16 |
| Référence | 3,44 | b | |

Comme évoqué précédemment, la très forte relation entre la transpiration et la consommation en eau nous permet de dire que la transpiration est plus élevée au sein des plantes cultivées avec le système autonome. Face à ce constat, il semble naturel de penser que les apports en eau dans cette zone y sont donc plus faibles. Or ceux-ci, bien que relativement proches entre les deux compartiments, y sont plus élevés dans le compartiment de référence. Ce dernier, en cumulant une activité transpiratoire plus faible et des apports en eaux plus élevés, est à l'origine de plus grandes pertes de la ressource en question.

L'étude du drainage de chaque lysimètre nous permet de mesurer l'envergure de ces différences quant à la bonne utilisation de la ressource en eau. Les écarts entre les volumes drainés des deux modalités sont importants dès le début de l'expérimentation, et, en les cumulant, ces derniers culminent à 36,72 litres de solution par mètre carré en moyenne (Cf. Figure 15). Même si le coup de production lié à un tel écart ne représente que 581 dollars américain par hectare, ce sont tout de même près de 40 mètres cubes de solutions nutritives qui sont économisés dans le compartiment autonome. Bien que l'impact économique ne soit pas significatif ici, la raréfaction croissante de la ressource en eau, encore plus forte dans les zones arides et semi-arides dont le Mexique fait partie, nous invite à considérer les avantages du système autonome sur la régulation de cette ressource. Celui-ci irrigue en effet les plants à une fréquence fixe, toutes les 20 à 25 minutes. Seuls les volumes de ces apports sont adaptés pour apporter plus ou moins d'eau durant ces pas de temps prédéfinis. Ces volumes apportés sont estimés à partir d'une balance qui mesure le poids et le volume de drainage de deux pains de cultures en continu. Malgré le fait que cette balance soit placée du côté nord du compartiment où est cultivé une autre variété, l'optimisation de l'arrosage y semble plus performante que dans le compartiment de référence. Dans ce dernier pourtant, l'adaptation de la stratégie d'irrigation y est relativement similaire. Les apports sont ajustés par rapport aux données d'un lysimètre balance qui mesure également l'évolution du poids et du drainage de deux pains de culture. Ici encore, la balance supporte des plantes d'une autre variété. Les mesures manuelles complémentaires des lysimètres de drainage similaires à ceux suivis durant cette étude, permettent au chef de culture de disposer de plus d'informations pour optimiser ses consignes. Cependant les lysimètres suivis pendant l'expérimentation n'ont pas été exploités pour cet ajustement de l'irrigation. En effet l'équipe supervisant la gestion de la ferti-irrigation a continué à se baser sur les lysimètres déjà en place dans le compartiment avant le début de l'expérimentation. La zone cultivée avec la variété Merlice® est aussi plus petite et en extrémité de compartiment. Le cumul de la différence variétale, de la taille et de l'isolement de sa parcelle, et de l'unique suivi des informations d'irrigation d'autres variétés cultivées dans d'autres espaces du compartiment sont sûrement à l'origine de ces erreurs de stratégie.

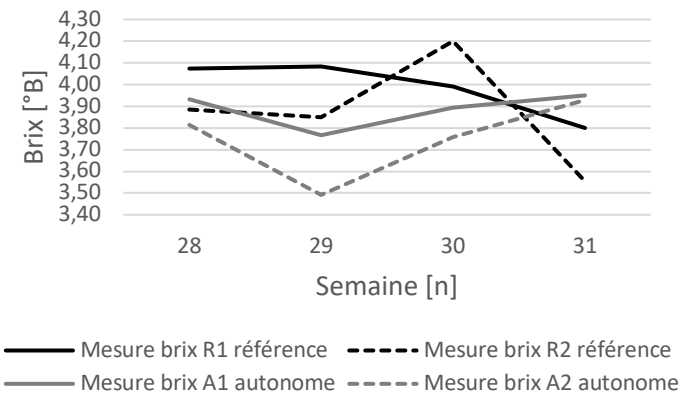



*Figure 16 : Évolution du degré Brix moyen observé durant quatre des semaines de l'expérimentation sur l'ensemble des lysimètres. Les valeurs indiquées ici sont obtenues en faisant la moyenne des premiers fruits de tous les bouquets récoltés sur les plantes des lysimètres en une semaine. [Source personnelle]*

Nous avons également cherché à savoir si des résultats aussi notables pouvaient être observés sur les variables de rendement et de qualité de fruits. Malheureusement, comme dit dans la partie précédente, les données de rendements mesurées sur les plantes disposées sur les lysimètres n'ont pas pu être exploitées car complètement irréalistes.

Il a également été difficile d'exploiter les données liées à la qualité des fruits car le protocole lié à la notation de ces dernières n'a pas bien été conçu. En effet, ce degré Brix dépend bien évidemment de la maturité du fruit. Or dans cette étude, de nombreux facteurs, outre celui de la régulation climatique, ont pu jouer sur cette maturité au moment de la récolte. L'absence de relevé de la colorimétrie et de la dureté des fruits ne nous a pas permis de savoir également si une teneur en sucre d'un fruit trop basse n'était pas reliée à une récolte plus précoce, identifiable via ces paramètres de couleur et de dureté. Ce qu'il nous est possible de dire toutefois, est que le degré Brix de l'ensemble des fruits prélevés dans cette étude varie entre 3,5 et 4,2 °B (Cf. Figure 16). Même si les valeurs les plus élevées ont été répertoriées dans le compartiment de référence, il nous est impossible de faire le lien entre ces valeurs et le type de système de régulation climatique. Toutefois, l'hétérogénéité de maturation observée sur les bouquets du compartiment de référence a en partie poussé les cueilleurs à retarder les récoltes dans le compartiment de référence. En effet, sur un même bouquet des différences visibles entre la maturité des premiers et des derniers fruits ont été identifiées. Les récoltes plus tardives sont à l'origine de rendements moins importants dans le compartiment de référence et d'une qualité de fruit qui y apparait plus élevée. Comme cette qualité de fruit est mesurée sur le premier fruit de chaque bouquet, le report des récoltes l'a donc naturellement augmenté dans notre étude.

L'analyse du rendement des deux modalités de régulation climatique s'est donc focalisée sur les valeurs enregistrées par le secteur de conditionnement (Cf. 4.2.3.1 Méthodes : influence du facteur sur la consommation en eau et la production). Ces données étant des rendements par semaine et ayant été collectées depuis plus longtemps, nous nous sommes permis de les analyser sur une durée supérieure à celle de l'étude. Dans le compartiment de la modalité autonome, le système de régulation climatique a été mis en place dès la semaine 10. Nous avons jugé bon d'observer les rendements des deux modalités à partir de cette date jusqu'à la fin de la période de stage. Aussi, nous n'avons pas interprété l'influence du système sur la culture avant la semaine 16 afin de laisser un délai suffisamment long pour pouvoir relier certaines différences de production au changement de système de régulation. Dans l'ensemble, les rendements dans les deux compartiments sont très proches et suivent une dynamique semblable. Avec le temps, la différence de rendement entre les deux

compartiments est même encore plus faible. En cumulant les rendements hebdomadaires depuis la semaine 10 jusqu'à la semaine 34, la différence absolue entre les deux compartiments est inférieure à 1 kilogramme par mètre carré, avec 50,05 kilogrammes de fruits frais produits au total par mètre carré dans la modalité de référence pour 49,08 kilogrammes dans le compartiment autonome (Cf. Figure 17).

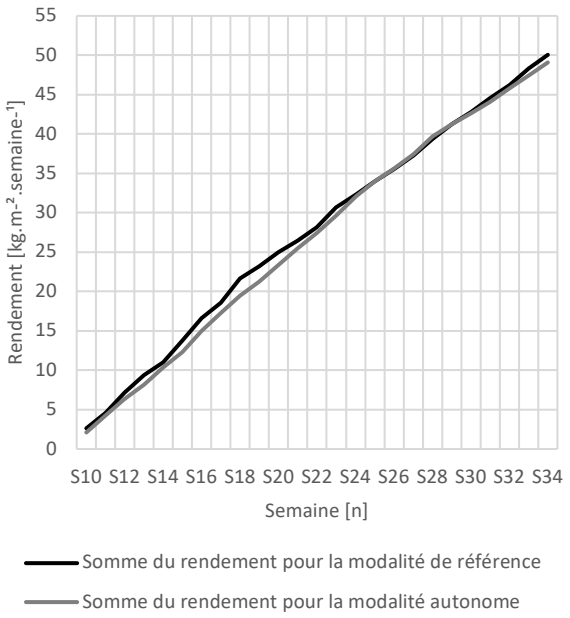



*Figure 17 : Rendement cumulé en kilogrammes de fruits frais du compartiment de référence et du compartiment autonome depuis l'activation du système autonome. [Source personnelle]*

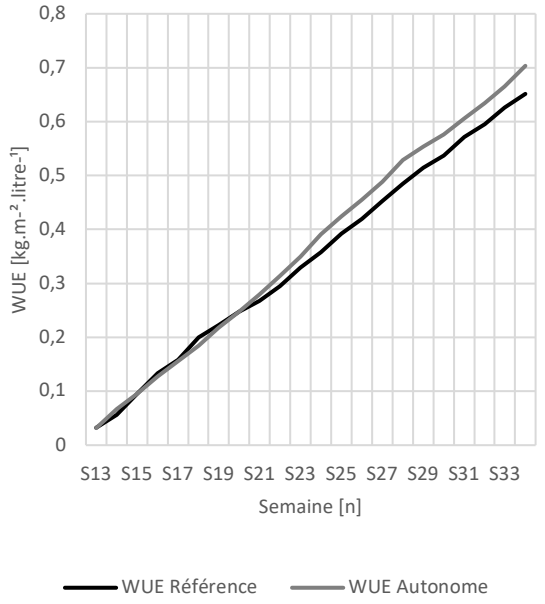



*Figure 18 : Efficience de l'utilisation de la ressource en eau sur le rendement (WUE) cumulée en kilogrammes produits par litre du compartiment de référence et du compartiment autonome depuis le début de la disponibilité des données liées au volume d'eau apporté, trois semaines après l'activation du système autonome. [Source personnelle]*

En prenant en compte les observations faites précédemment à partir des données mesurées sur les lysimètres, il nous a semblé utile de mesurer l'efficience de l'utilisation de l'eau, soit la capacité de production de rendement en fruit des deux compartiments avec une même quantité d'eau. Cette efficience d'utilisation de la ressource en eau, appelée WUE (pour *Water Use Efficiency*), a été calculé de la sorte :

$$WUE = \frac{Y}{W}$$

Avec $W$, la quantité d'eau apporté par semaine et par mètre carré pour chaque compartiment, et $Y$, le rendement en fruits récoltés par semaine et pour chaque compartiment.

Les informations concernant les volumes d'eaux apportés n'ont pu être récupérées qu'à partir de la semaine 13. Assurément, avec de si faibles différences dans le rendement produit et avec des apports en eau moins élevés dans le compartiment autonome, l'efficience d'utilisation de la ressource en eau dans ce dernier y est plus élevée. En cumulant ces valeurs, l'écart entre les modalités se creuse jusqu'à une différence en fin de saison de 52 grammes de fruits frais produit en plus par litre d'eau, avec 651 grammes de fruits produit par litre dans le compartiment de référence pour 703 grammes pour le compartiment autonome (Cf. Figure 18). Ces données supplémentaires nous confirment la meilleure performance de la stratégie de pilotage du compartiment autonome face au témoin.

L'étude de certains paramètres climatiques devrait nous aider à comprendre pourquoi la consommation en eau, et indirectement la transpiration, est plus élevée dans la modalité autonome. Les principaux de ces paramètres sont la température, l'hygrométrie et le déficit pression vapeur, fonction de ces deux premières variables.

Sur les périodes de jour comme sur les périodes de nuit, les DPV des deux modalités, bien que proches, y sont plus élevés dans la modalité autonome. En moyenne sur l'ensemble de la période de l'expérimentation, ce déficit y est 4% plus élevé avec une valeur diurne moyenne de 0,78 kPA dans la modalité autonome pour 0,75 kPa dans le compartiment de référence (Cf. Annexe 1). Sur la période de jour, fixé entre 8h et 20h, c'est le compartiment autonome qui présente les DPV les plus élevés sur 24 des 32 jours du suivi de l'expérimentation. Cette différence, favorable à une activité de transpiration plus élevé ne semble malgré tout pas assez importante pour pouvoir justifier les observations faites précédemment.

L'atmosphère du compartiment autonome y apparait globalement plus sèche, avec une moyenne diurne de 74% pour 75% dans le compartiment de référence pour l'ensemble de la période (Cf. Annexe 2). Un changement de consigne dans la modalité témoin le 31 juillet contredit cette tendance pendant quelques jours et ses répercussions sont d'ailleurs observable sur le DPV durant la même période (Cf. Annexe 1 & 2). Malgré tout, les différences les plus notables et persistantes dans la durée peuvent être observées en analysant les températures des deux compartiments.

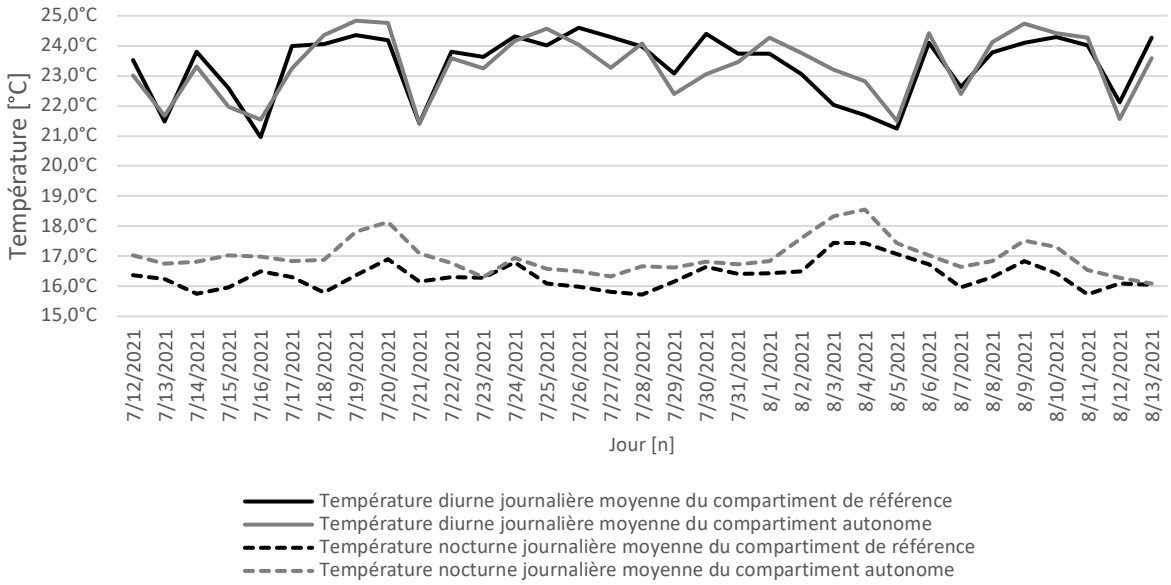



*Figure 19 : Évolution des températures nocturnes et diurnes journalières moyennes du compartiment de référence et du compartiment autonome sur la période d'expérimentation. [Source personnelle]*

Autant les différences dans les températures diurnes moyennes sont faibles et semblent varier avec le temps sans réellement suivre une tendance qui pourrait être liée au facteur du système de régulation, autant le comportement de la température de nuit semble être réellement différent entre les deux modalités. Sur toute la période d'expérimentation cette température y est plus élevée. Même si la différence moyenne en soit n'est pas flagrante, avec 17°C pour le compartiment autonome, et 16,4°C pour le compartiment de référence, l'observation des données rend visible la tendance d'établissement d'une consigne plus haute pour ce paramètre dans la modalité autonome (Cf. Figure 19). En superposition avec des températures de jours très similaires, le différentiel de température, soit l'écart entre la température de nuit et la température de jour, y est différent. Même si ce différentiel, comme dans la majorité des

systèmes agricoles sous serre, reste négatif dans les deux modalités, il y est en moyenne plus élevé dans la modalité autonome avec -6,4°C contre -7°C dans le témoin.

Il est enfin important de noter la différence visible des consignes d'aération. Le compartiment autonome tend à conduire une aération progressive et beaucoup plus lissée dans la journée alors que celle du compartiment témoin réalise des adaptations plus nettes et soudaines, en réponse aux informations prises dans la serre (Cf. Annexe 3). Dans la journée le compartiment autonome adapte son climat presque indépendamment du pourcentage d'ouverture de ses ouvrants, notamment par le biais de la ventilation artificielle, qui y fonctionne en moyenne à 65% durant la phase de jour contre 60% pour le compartiment de référence durant toute la période d'expérimentation. Néanmoins, la variation des températures horaires de jour très proches entre les deux compartiments, avec un écart-type de 4,1°C pour la référence et 4°C pour le compartiment autonome, ne nous permet pas de dire que cette conduite à l'apparence plus douce, conduirait à un climat plus homogène. Au contraire, en regardant les variations hygrométriques horaires de jour sur l'ensemble de la période, représentées par un écart-type de 7,9% dans le compartiment témoin pour 8,5% dans l'autonome, il semblerait que le climat dans ce dernier y change de manière légèrement plus élevée. Il nous parait donc difficile d'établir un lien entre la stratégie d'aération et la transpiration directement.

La thermomorphogénèse traduit l'influence directe des températures sur la morphologie de la plante. Des températures de nuit et des différentiels de température plus élevés favorisent un développement végétatif et l'augmentation de la surface foliaire (Heuvelink 1989; Erwin & Heins 1995). Les observations faites sur les températures de nuit et les mesures d'indices de surface foliaire nous invitent donc à considérer l'influence de ces températures sur le développement des plantes, décrite dans la littérature. Les consignes de pilotage différentes de ces températures pourraient donc être à l'origine de la surface foliaire plus importante relevée dans la première expérimentation. Cette plus grande surface foliaire, en augmentant la quantité de stomates et de surface d'échanges gazeux des plantes, semble être en effet la cause la plus probable d'une transpiration plus élevée, notamment face à des DPV restant proches pour les deux compartiments.

### 4.3.2 Modélisation de la transpiration

En comparant les mesures réalisées avec les lysimètres à celles modélisées à partir des équations présentées précédemment, basées sur les paramètres expliqués en annexe 5, nous avons pu obtenir une qualité d'estimation relativement intéressante. Bien que plus simple, le modèle 2 propose des estimations plus cohérentes avec la réalité. Son coefficient de détermination y est d'ailleurs de 0,73 en moyenne sur l'ensemble des lysimètres, contre 0,66 pour le modèle 1, et il y culmine à 0,84 et 0,75 respectivement, dans la modélisation de la transpiration des plantes du lysimètres R2 (Cf. Tableau 5).

Le modèle 1 propose tout de même des valeurs présentant moins d'écart avec les valeurs mesurées avec une RRMSE moyenne de 18% contre 24% dans le compartiment autonome. Pour le modèle 2, les écarts entre les valeurs prédites y sont plus faibles pour la modélisation faite à partir des données du compartiment autonome. Le modèle 1 révèle des écarts presque uniquement sur les données provenant du lysimètre R1, installé dans le compartiment de référence. Ce point est intéressant quand on sait que la meilleure estimation de ce modèle est celle faite à partir des données du lysimètres R2. Or l'unique variation entre les données de ce lysimètre et de celui à l'origine du plus d'erreur est l'indice de surface foliaire, car les dispositifs évoluent dans le même compartiment. Deux hypothèses s'ouvrent donc à nous.

Soit la mesure de cet indice foliaire ne permet pas de décrire l'indice foliaire réel des plantes provenant des lysimètres, entrainant des erreurs d'estimation, soit la consommation en eau y

est plus hétérogène et plus difficile à décrire. La mesure de l'indice foliaire est en effet estimée à partir de 4 des 12 plantes de chaque lysimètre et avec le modèle d'estimation décrit précédemment. Le biais lié aux erreurs possibles d'estimation du modèle et à la plus ou moins bonne qualité de représentation de l'ensemble des 4 plantes choisies, semblent malgré tout léger. Le modèle d'estimation a été validé précédemment avec une qualité d'estimation très satisfaisante et les écarts enregistrés entre les plantes mesurées pour le lysimètre R1 ne sont pas importants.

D'un autre côté, il semblerait que la qualité de l'estimation varie d'un lysimètre à un autre à cause d'une hétérogénéité probable dans la consommation en eau. En effet, les caractéristiques spécifiques aux 12 plantes de chaque lysimètre sont à l'origine d'une consommation différente. Même si l'information relevée par le lysimètre résume une consommation en eau représentative de l'espace de production, la modélisation de la transpiration se fait quant à elle, via un paramètre moyen d'indice de surface foliaire, qui, bien que représentatif de la moyenne, ne peut pas retranscrire cette hétérogénéité. La meilleure qualité d'estimation des deux modèles, retrouvée sur le même lysimètre (R2) nous invite à penser dans ce sens.

*Tableau 5 : Indicateurs de qualité de prédiction ($R^2$ et RRMSE) des deux modèles pour chaque lysimètre et en moyenne sur l'ensemble, avant et après la phase de calibration. [Source personnelle]*

| **Modèle** | **$R^2$** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **R1** | **R2** | **A1** | **A2** | **Moyenne** |
| | **Avant calibration** | | | | |
| Modèle 1 | 0,61 | 0,75 | 0,60 | 0,66 | 0,66 |
| Modèle 2 | 0,68 | 0,84 | 0,70 | 0,70 | 0,73 |
| | **Après calibration** | | | | |
| Modèle 1 | 0,65 | 0,85 | 0,67 | 0,67 | 0,71 |
| Modèle 2 | 0,67 | 0,86 | 0,72 | 0,70 | 0,74 |
| | **RRMSE** | | | | |
| | **R1** | **R2** | **A1** | **A2** | |
| | **Avant calibration** | | | | |
| Modèle 1 | 29% | 13% | 15% | 14% | 18% |
| Modèle 2 | 37% | 27% | 15% | 17% | 24% |
| | **Après calibration** | | | | |
| Modèle 1 | 27% | 17% | 16% | 15% | 19% |
| Modèle 2 | 34% | 25% | 14% | 16% | 22% |

La calibration des modèles a principalement suivi une méthode empirique d'ajustement manuel des principaux paramètres qu'il nous était possible d'adapter. Les premières étapes de cette calibration nous ont permis de voir que l'application d'un LAI moyen pour l'ensemble de la période et pour chaque lysimètre nous permettait d'améliorer les coefficients de détermination de nos estimations tout en réduisant leurs écarts. Initialement, cet indice a été mesuré une fois par semaine les trois premières semaines de l'expérimentation. Or la variation de cet indice, notamment entre la première mesure durant laquelle l'effeuillage n'avait pas été réalisé depuis longtemps, et la deuxième faite juste après cette activité, semble avoir créé du bruit faisant chuter la qualité de modélisation. La modification du LAI a surtout amélioré la capacité de prédiction du modèle 1 car le second modèle ne prend pas en compte cet indice.

La faible quantité de paramètres impliqués dans le modèle 5 en a limité les possibilités d'amélioration durant la phase de calibration. Nous nous sommes donc focalisés dans un premier temps sur le paramètre de température de feuille, directement impliqué dans l'équation définissant le modèle et indirectement par le biais du calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection. Normalement considérée comme une valeur d'entrée, la difficulté et la technicité exigée pour mesurer cette température nous a contraint à l'estimer. Au départ,

ce paramètre était simplement obtenu en enlevant 1 degré à la température mesurée dans le compartiment du lysimètre étudié. En utilisant le sous-modèle de température de feuille décrit en annexe 5, qui estime cette température à partir du déficit pression vapeur, du rayonnement solaire et de la constante psychrométrique, nous avons pu gagner en qualité d'estimation pour le modèle 2. En effet pour ce dernier, les coefficients de détermination y sont plus élevés pour les modélisations faites avec les données du lysimètre R2 et A1. Ceux relatifs aux autres lysimètres restent inchangés. Néanmoins, ce sous-modèle a réduit la qualité de prédiction du modèle 1 sur les modélisations faites sur l'ensemble des lysimètres. Nous l'avons donc abandonné pour ce dernier par la suite.

Le paramètre de vent est également une variable prise en compte par le calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection, mais aussi par le calcul de résistance aérodynamique du modèle. L'absence d'anémomètre durant la phase d'expérimentation nous a forcé, tout comme la température de feuille, à utiliser un sous-modèle d'estimation. Ce sous-modèle, décrit en annexe 5, est à la fois fonction du climat extérieur, de l'aération et de la ventilation du compartiment où évolue le lysimètre étudié. Ce dernier n'a malgré tout eu que très peu d'influence sur la qualité des modélisations faite avec les deux modèles.

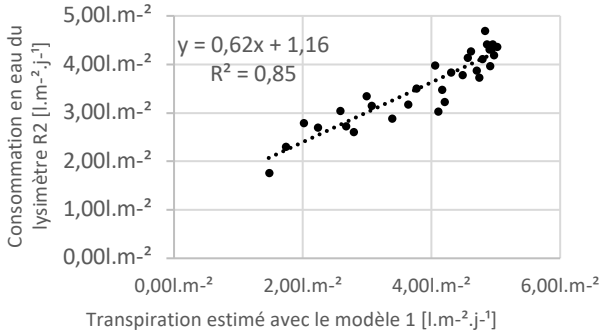



*Figure 20 : Relation linéaire entre les estimations de transpiration du modèle 1 faites à partir des plantes et des données relatives au lysimètre R2 et la consommation en eau réelle de ce dernier. [Source personnelle]*

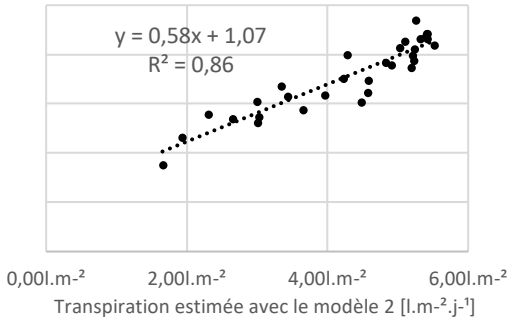



*Figure 21 : Relation linéaire entre les estimations de transpiration du modèle 2 faites à partir des plantes et des données relatives au lysimètre R2 et la consommation en eau réelle de ce dernier. [Source personnelle]*

Enfin, il nous a semblé bon de tester d'autres méthodes de calculs des résistances stomatique, aérodynamique et de canopée, paramètres importants du modèle 1. Les fonctions à l'origine de ces résistances sont variées et dépendent du système agricole étudié. Initialement, la résistance de canopée a été calculée à partir d'un rapport entre la résistance stomatique, estimée à partir du rayonnement solaire, et le LAI actif, définit à partir de la règle présente en annexe 4. La résistance stomatique traduit la force de limitation des échanges transpiratoire des stomates d'une plante. La calculer uniquement à partir du rayonnement ne nous a pas semblé suffisant. Nous avons donc reformulé la fonction de la résistance de canopée afin qu'elle prenne en compte la résistance stomatique en la confrontant également au déficit pression vapeur. Le paramètre de résistance de canopée choisi après la phase de calibration est décrit en annexe 5. Ce dernier a fortement contribué à l'amélioration des résultats du modèle 1. Le changement du paramètre de résistance aérodynamique a constitué la dernière étape de la phase de calibration de cette étude. Nous avons finalement pris en compte la fonction décrite en annexe 5.

Dans l'ensemble, cette étape de calibration nous a permis d'améliorer la puissance des deux modèles. Cette amélioration est significative sur le lysimètre R2 où les estimations assurent des coefficients de détermination entre 0,85 et 0,86 (Cf. Figure 20 & 21). D'ailleurs, depuis les premières observations, durant la calibration et après celle-ci, la modélisation a toujours été

meilleure sur ce lysimètre. Cela nous invite à reconsidérer la qualité des valeurs réelles et douter de leur capacité à nous permettre d'obtenir de meilleures estimations.

Les résultats obtenus sur ce lysimètre sont prometteurs et attestent d'une bonne qualité de modélisation mais dans l'ensemble, les modèles déployés ici ne proposent pas des estimations suffisantes pour pouvoir être utilisés sur le terrain. Dans les conditions et le contexte de l'étude, il ne semblerait toutefois pas judicieux de ne plus considérer les deux modèles étudiés ici. La bonne qualité des résultats sur l'un des quatre lysimètres est encourageante et nous montre que les deux modèles peuvent y estimer avec autant de qualité la transpiration. Malgré des coefficients de détermination inférieur à 0,90, la visualisation des données modélisées juxtaposées aux valeurs réelles nous montre d'ores et déjà l'intérêt potentiel de travailler avec ce genre d'outils sur le terrain.

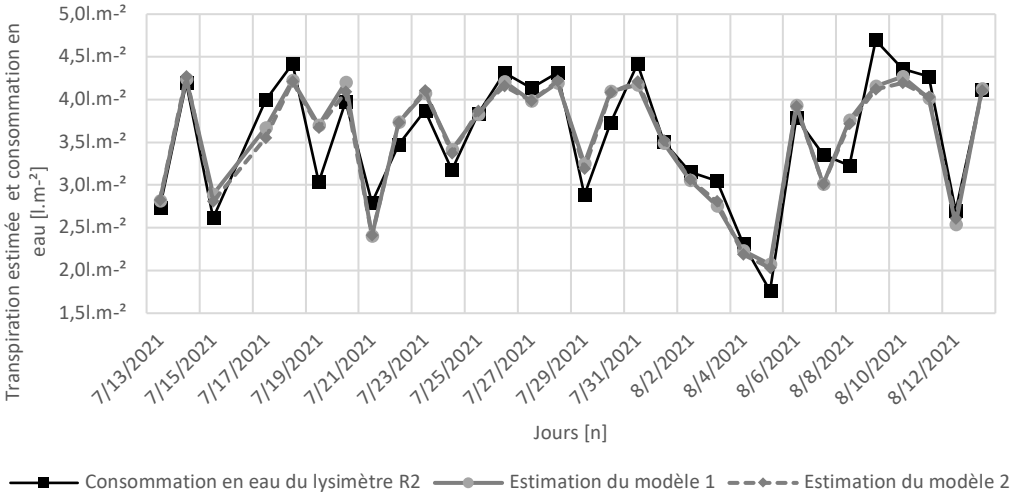



*Figure 22 : Comparaison de la consommation en eau journalière du lysimètre R2 du compartiment de référence avec les estimations de transpiration du modèle 1 et du modèle 2 après régression linéaire. [Source personnelle]*

Globalement, la figure 22 montre des estimations qui pourraient largement être utilisées dans le soutien de chef de culture pour l'élaboration de ses consignes d'arrosages. Avec des prédictions climatiques, il serait ainsi capable d'anticiper l'évolution de l'activité de transpiration et d'arroser en conséquence. Mais le réel intérêt de cette modélisation serait de travailler à des fréquences d'estimations plus élevées. Ces deux modèles en ont la capacité mais ils nécessiteraient une nouvelle validation, avec des outils de mesure fonctionnant à la même fréquence, comme ceux que nous aurions dû utiliser au départ. En travaillant avec des estimations plus rapides, validées au préalable sur le terrain, les calculs fondamentaux du modèle choisi pourraient être intégrés à l'ordinateur climatique, proposant à l'utilisateur, au minimum, une aide à la prise de décision, et au maximum, à la programmation du volume d'apport nécessaire pour combler la perte estimée.

### 4.4 CONCLUSION

La deuxième partie de cette étude nous a permis de constater les différences de consommation en eau des plantes dans les deux modalités du facteur de régulation climatique. L'absorption en eau plus élevée des plantes du compartiment autonome, et la relation forte entre celle-ci et la transpiration nous permet donc de confirmer l'argument du fabricant proposant la solution de régulation climatique. Néanmoins, dans le contexte de notre étude, aucune différence n'a pu être observée sur le rendement des plantes. Cependant, la stratégie de pilotage plus optimale du compartiment autonome assure une meilleure efficience de l'utilisation de la ressource en eau et des volumes d'eau perdue beaucoup plus faibles. Les

consignes climatiques de ce compartiment, notamment la conduite de ses températures de nuit, semblent favoriser un développement végétatif plus important qui serait à l'origine des observations faites sur l'indice de surface foliaire durant la première expérimentation.

La première approche de modélisation réalisée ici, bien que perturbée par des problèmes d'approvisionnement et limitée par son dispositif expérimental, a permis de dégager des estimations satisfaisantes sur au moins une des parcelles élémentaires étudiées. Ces premiers résultats devraient pouvoir motiver l'entreprise à remettre en place une expérimentation avec une méthodologie lui permettant d'améliorer la validation et la performance de ses modèles.

## 5 CONCLUSION GENERALE ET OUVERTURE

Les deux expérimentations réalisées dans ce programme nous ont permis d'observer de réelles différences entre les plantes cultivées dans la modalité de régulation autonome et celles évoluant dans un compartiment de référence. Avec une consommation en eau et une surface foliaire plus importante, les plantes cultivées avec ce nouveau système semblent en effet plus transpirer sous cette solution. Même si nous n'avons pas pu relier cette transpiration à des performances agronomiques plus intéressantes, une meilleure utilisation de la ressource en eau dans le compartiment autonome a pu attester de sa supériorité technique quant à la gestion de l'arrosage durant cette étude. En résulte une meilleure efficience de la ressource en eau et des drainages plus faibles.

Certains signaux quant à la conduite du climat dans le système autonome, peuvent expliquer l'origine de telles différences de transpiration et de consommation en eau. La surface foliaire plus grande, l'une des différences les plus notables parmi les variables étudiées dans chaque compartiment, pourrait être le résultat d'une consigne de température de nuit et d'un différentiel de température plus élevé. Le déficit pression vapeur, suivant une tendance légèrement plus haute, pourrait aussi participer à la transpiration plus élevée dans le système étudié. Globalement, ce système semble favoriser un développement végétatif.

Les données collectées nous ont permis d'établir deux outils de modélisation. Le premier permet une estimation de l'indice de surface foliaire à partir de la mesure de la longueur et de la largeur de 4 feuilles par plantes, identifiées comme significatives. Validé avec un échantillon de 20 plantes, équitablement répartis dans les deux compartiments, ce modèle permet une bonne estimation, est non destructif et réduit la durée des mesures par un facteur 10. Le deuxième outil, consacré à la modélisation de la transpiration, n'a pas pu être validé dans des conditions optimales mais nous a toutefois montré des résultats très prometteurs avec un coefficient de détermination culminant à 0,86 sur la période étudiée.

Vu l'ampleur d'une telle problématique, et même si ce mémoire constitue une base solide d'analyse de l'influence du facteur de régulation climatique, il semble nécessaire de l'accompagner par d'autres travaux dans les années à venir. En effet, la mesure d'autres paramètres comme la dureté des fruits, leur couleur, leur calibre et leur nombre par bouquet nous permettrait d'identifier d'autres influences que celles résultantes de ce premier programme. Aussi, la réflexion en amont quant à la mise en place d'une expérimentation pourrait en favoriser le dispositif expérimental et la qualité des observations. En connaissance de causes, il pourrait donc être envisageable de lancer une culture d'une même variété en simultanée dans les deux compartiments, réduisant les biais possibles liées à des contraintes culturales différentes et rallongeant la période d'étude, en permettant notamment l'analyse du comportement des plantes en phase de croissance initiale. Face aux écarts observés dans la conduite d'irrigation, il peut aussi être intéressant de mesurer la conductivité du substrat afin de sonder la potentialité de lixiviation causée par un drainage plus important. En outre,

l'analyse complète de la consommation énergétique et des coûts de production du système étudié permettrait d'apporter plus d'éléments pour en mesurer la rentabilité.

Les outils de modélisation peuvent aussi être amélioré dans les années à venir. Le modèle d'estimation de l'indice de surface foliaire peut également être revalidé sur des cultures plantées en même temps de manière à réduire l'écart morphologique que nous n'avons pas pu éviter ici. En formant du personnel, il serait également possible de réduire à un maximum le temps d'analyse et donc la potentialité d'apparition de biais. Une activité d'effeuillage réalisée de manière régulière et homogène en amont de la prise de mesure pourrait également permettre de réduire les biais liés aux variations de ces pratiques. En réduisant les parcelles élémentaires à un individu, en augmentant le nombre de répétitions, en travaillant avec des appareils mesurant la transpiration à une fréquence plus élevée et en étendant la période d'analyse, il serait également possible à Red Sun Farms® de tester avec plus de rigueur un outil qui lui permettrait d'augmenter significativement la qualité de gestion de sa stratégie d'arrosage. Dans une zone semi-désertique, où la raréfaction de la ressource en eau devient problématique, un modèle de transpiration pourrait en effet s'avérer indispensable dans les années à venir.

Face à une exigence technique plus forte induite par le développement technologique qu'a connu l'industrie des serres agricoles ces dernières années, et dans un contexte où la main d'œuvre qualifiée est devenue rare, les livrables proposés et le système climatique étudié ici proposent des perspectives intéressantes. Avec très peu d'interventions, ce système a permis de dégager des rendements équivalents à une référence tout en faisant des économies en eau. Les deux outils conçus dans ce programme tendent également à accompagner au mieux les serristes pour faciliter leurs prises de décisions. Mesurer la rentabilité d'une telle solution et avec plus d'indicateurs pourrait permettre d'accompagner le fabriquant à perfectionner son service et conduire Red Sun Farms® à l'utiliser à plus large échelle. Améliorer les outils développés ici et les intégrer à l'ordinateur climatique existant faciliterait également les fonctions du chef de culture en l'accompagnant dans ses décisions. Face à ces premiers constats et au regard de l'immensité des possibilités futures, nous pouvons donc naturellement nous demander jusqu'où ira cet accompagnement. Combien de surfaces un chef de culture pourrait-il piloter dans les années à venir face à l'avènement de ces solutions ? Dans un contexte de démocratisation de l'intelligence artificielle, combien de temps nous reste-t-il encore pour que cette discipline ait complétement révolutionné les standards de la régulation climatique et de la gestion des serres ? Enfin nous pouvons également nous interroger sur l'importance de la sensibilité de l'homme par rapport au programme, dans la lecture et l'analyse d'une production où c'est du vivant dont il est question.

## BIBLIOGRAPHIE


Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. In: FAO irrigation and drainage paper. Vol, 56. 300 p. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm (consulté le 13/07/2021)

Aznar-Sánchez, J.A.; Velasco-Muñoz, J.F.; López-Felices, B.; Román-Sánchez, I.M. 2020. *An analysis of global research trends on greenhouse technology: towards a sustainable agriculture*. In: International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol, 17. No, 2. 664 p. https://doi.org/10.3390/ijerph17020664 (consulté le 19/08/2021)

Ben-Gal, A.; Karlberg, L.; Jansson, P.E.; Shani, U. 2003. *Temporal robustness of linear relationships between production and transpiration*. In: Plant and Soil. Vol, 251. No, 2. 8 p. 211-218. https://www.jstor.org/stable/24128558 (consulté le 21/08/2021)

Ben-Gal, A. & Shani, U. 2002. *Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress*. In: Plant and Soil. Vol, 247. No, 2. 11 p. 211-221. https://doi.org/10.1023/A:1021556808595 (consulté le 22/08/2021)

Blanco, F.F. & Folegatti, M.V. 2003. *A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants*. In: Horticultura Brasileira. Vol, 21. No, 4. 4 p. 666-669. https://doi.org/10.1590/S0102-05362003000400019 (consulté le 07/04/2021)

Bontsema, J.; Hemming, J.; Stanghellini, C.; de Visser, P.; van Henten, E.J.; Budding, J.; Rieswijk, T.; Nieboer, S. 2007. *Online monitoring van transpiratie en fotosynthesactiviteit.* 78 p. Wageningen UR Glastuinbouw. https://edepot.wur.nl/24034 (consulté le 27/07/2021)

Bot, G.P.A. 1983. *Greenhouse Climate: From Physical Processes to a Dynamic Model*. Nature and meteo. [Thèse] Wageningen University & Research. 240 p. https://edepot.wur.nl/188427 (consulté le 24/08/2021)

Carmassi, G.; Bacci, L.; Bronzini, M.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Bellocchi, G.; Massa, D.; Pardossi, A. 2013. *Modelling transpiration of greenhouse gerbera (gerbera jamesonii h. Bolus) grown in substrate with saline water in a mediterranean climate*. In: Scientia Horticulturae. Vol, 156. 10 p. 9-18. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.03.023 (consulté le 24/08/2021)

Charreyron, M. 2011. *Suivi de la transpiration et de la conductance stomatique chez le pommier sous trois régimes hydriques : irrigation, sécheresse et réhydratation*. [Stage] Université Blaise Pascal (Clermont Ferrand 2) (UBP). 17 p. https://hal.inrae.fr/hal-02811529/document (consulté le 28/04/2021)

Donatelli, M.; Bellocchi, G. & Carlini, L. 2006. *Sharing knowledge via software components: models on reference evapotranspiration*. In: European Journal of Agronomy. Vol, 24. No, 2. 7 p. 186-192. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.07.005 (consulté le 03/08/2021)

Durand, J.L. 2007. *Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques*. In: Fourrages, Association Française pour la Production Fourragère. 15 p. 181-195. https://hal.inrae.fr/hal-02666769/document (consulté le 12/08/2021)

Dynamax. 2007. *Dynagage sap flow sensor user manual*. 41 p. Dynamax Incorporated. https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage_Manual.pdf (consulté le 07/05/2021)

Elings, A.; de Visser, P.H.B.; Marcelis, L.F.M.; Heinen, M.; van den Boogaard, H.A.G.M.; Gieling, T.H.; Werner, B.E. 2004. *Feed-forward control of water and nutrient supply in greenhouse horticulture: development of a system*. In: Acta Horticulturae. Vol, 654. 8 p. 195-202. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.654.21 (consulté le 18/06/2021)

Erwin, J.E. & Heins, R.D. 1995. *Thermomorphogenic responses in stem and leaf development*. In: HortScience. Vol, 30. No, 5. 10 p. 940-949. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.5.940 (consulté le 07/08/2021)

Garnett, T.; Appleby, M.C.; Balmford, A.; Bateman, I.J.; Benton, T.G.; Bloomer, P.; Burlingame, B. et al. 2013. *Sustainable intensification in agriculture: premises and policies*. In: Science. Vol, 341. No, 6141. 2 p. 33-34. https://doi.org/10.1126/science.1234485 (consulté le 23/07/2021)

Gong, X.; Liu, H.; Sun, J.; Gao, Y.; Zhang, X.; Jha, S.K.; Zhang, H.; Ma, X.; Wang, W. 2017. *A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse*. In: Journal of Arid Land. *Vol,* 9. No, 4. 17 p. 530-546. https://doi.org/10.1007/s40333-017-0020-8 (consulté le 04/05/2021)

Gong, X.; Liu, H.; Sun, J.; Gao, Y.; Zhang, H. 2019. *Comparison of Shuttleworth-Wallace model and dual crop coefficient method for estimating evapotranspiration of tomato cultivated in a solar greenhouse*. In: Agricultural Water Management. Vol, 217. 13 p. 141-153. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.012 (consulté le 29/06/2021)

Gong, X.; Qiu, R.; Ge, J.; Bo, G.; Ping, Y.; Xin, Q.; Wang, S. 2021. *Evapotranspiration partitioning of greenhouse grown tomato using a modified Priestley–Taylor model*. In: Agricultural Water Management. Vol, 247. No, 106709. 11 p. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106709 (consulté le 28/07/2021)

Hanks, R.J. 1974. *Model for predicting plant yield as influenced by water use*. In: Agronomy Journal. Vol, 66. No, 5. 6 p. 660-65. https://doi.org/10.2134/agronj1974.00021962006600050017x (consulté le 21/06/2021)

Hemming, S.; de Zwart, F.; Elings, A.; Petropoulou, A.; Righini, I. 2019. *Remote control of greenhouse vegetable production with artificial intelligence-greenhouse climate, irrigation, and crop production*. In: Sensors. Vol, 19. No, 8. 22 p. https://doi.org/10.3390/s19081807 (consulté le 17/06/2021)

Hemming, S.; de Zwart, F.; Elings, A.; Petropoulou, A.; Righini, I. 2020. *Cherry tomato production in intelligent greenhouses-sensors and ai for control of climate, irrigation, crop yield, and quality*. In: Sensors. Vol, 20. No, 22. 30 p. https://doi.org/10.3390/s20226430 (consulté le 17/06/2021)

Heuvelink, E. 1989. *Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants*. In: Scientia Horticulturae. Vol, 38. No, 1-2. 12 p. 11-22. https://doi.org/10.1016/0304-4238(89)90015-0 (consulté le 07/08/2021)

Heuvelink, E.; Bakker, M.J.; Elings.; Kaarsemaker, R.C.; Marcelis, L.F.M. 2005. *Effect of leaf area on tomato yield*. In: Acta Horticulturae. Vol, 691. 8 p. 43-50. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.2 (consulté le 07/08/2021)

Jo, W.J. & Shin, J.W. 2020. *Effect of leaf-area management on tomato plant growth in greenhouses*. In: Horticulture, Environment, and Biotechnology. Vol, 61. No, 6. 8 p. 981-988. https://doi.org/10.1007/s13580-020-00283-1 (consulté le 29/07/2021)

Joe Acquah, S.; Yan, H.; Zhang, C.; Wang, G.; Zhao, B.; Wu, H.; Zhang, H. et al. 2018. *Application and evaluation of Stanghellini model in the determination of crop evapotranspiration in a naturally ventilated greenhouse*. In: International Journal of Agricultural and Biological Engineering. Vol, 11. No, 6. 9 p. 95-103. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181106.3972 (consulté le 23/07/2021)

Jolliet, O.; Bailey, B.J.; Hand, D.J.; Cockshull, K. 1993. *Tomato yield in greenhouses related to humidity and transpiration*. In: Acta Horticulturae. Vol, 328. 10 p. 115-24. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.328.8 (consulté le 21/06/2021)

Kim, H.J.; Lee, D.H.; Ahn, S.W.; Kim, W.K.; Hur, S.O.; Choi, J.Y.; Chung, S.O. 2015. *Design and testing of an autonomous irrigation controller for precision water management of greenhouse crops*. In: Engineering in Agriculture, Environment and Food. Vol, 8. No, 4. 7 p. 228-34. https://doi.org/fvpd10.1016/j.eaef.2015.03.001 (consulté le 19/07/2021)

Kramer, P.J. 1937. *The relation between rate of transpiration and rate of absorption of water in plants*. In: American Journal of Botany. Vol, 24. No, 1. 6 p. 10-15. https://doi.org/10.2307/2436949 (consulté le 28/06/2021)

Leonardi, C.; Guichard, S. & Bertin, N. 2000. *High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits*. In: Scientia Horticulturae. Vol, 84. No, 3-4. 12 p. 285-296. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00127-2 (consulté le 23/07/2021)

López-Cruz, I.L. ; Fitz-Rodríguez, E.; Salazar-Moreno, R.; Rojano-Aguilar, A.; Kacira, M. 2018. *Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate: a review*. In: European Journal of Horticultural Science. Vol, 83. No, 5. 11 p. 269-279. https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.1 (consulté le 23/07/2021)

Lu, N., Nukaya, T.; Kamimura, T.; Zhang, D.; Kurimoto, I.; Takagaki, M.; Maruo, T.; Kozai, T.; Yamori, W. 2015. *Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season*. In: Scientia Horticulturae. Vol, 197. 7 p. 17-23. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001 (consulté le 23/06/2021)

Maire, V. 2012. *Des traits des graminées au fonctionnement de l'écosystème prairial: une approche de modélisation mécaniste*. Biodiversité et écologie. [Thèse] Université Blaise Pascal (Clermont Ferrand 2). 313 p. https://hal.inrae.fr/tel-02812285/document (consulté le 24/07/2021)

Marcelis, L.F.M. ; Elings, A.; de Visser, P.H.B.; Heuvelink, E. 2009. *Simulating growth and development of tomato crop*. In: Acta Horticulturae. Vol, 821. 10 p. 101-110. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.821.10 (consulté le 22/06/2021)

Martínez-Ruiz, A.; López-Cruz, I.L.; Ruiz-García, A.; Ramírez-Arias, A. 2012. *Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (Solanum lycopersicum L.) en invernadero*. In: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol, 3. No, 4. 10 p. 757-756. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900019&lng=es&nrm=iso (consulté le 27/07/2021)

Monteith, J.L. 1965. *Evaporation and Environment*. In: Symposia of the Society for Experimental Biology. 19 p. 205-234. https://repository.rothamsted.ac.uk/download/8ae229c1c0ea4f617750d8e98d2ee6c356c306fc01a39bb584a18eb112f443e1/3879831/Monteith65.pdf (consulté le 03/05/2021)

Morille, B. 2012. *Élaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres: analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques*. Sciences de l'environnement. [Thèse] Agrocampus-Ouest, centre d'Angers. 288 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00958617/document (consulté le 16/07/2021)

Mulholland, B.J.; Fussell, M.; Edmondson, R.N.; Basham, J.; Mckee, J.M.T. 2001. *Effect of VPD, K nutrition and root-zone temperature on leaf area development, accumulation of Ca and K yield in tomato*. In: The Journal of Horticultural Science and Biotechnology. Vol, 76. No, 5. 7 p. 641-647. https://doi.org/10.1080/14620316.2001.11511424 (consulté le 12/06/2021)

Nemeskéri, E.; Neményi, A.; Bőcs, A.; Pék, Z.; Helyes, L. 2019. *Physiological factors and their relationship with the productivity of processing tomato under different water supplies*. In: Water. Vol, 11. No, 3. 15 p. https://doi.org/10.3390/w11030586 (consulté le 22/07/2021)

Nikolaou, G.; Neocleous, D.; Katsoulas, N.; Kittas, C. 2019. *Irrigation of greenhouse crops*. In: Horticulturae. Vol, 5. No, 1. 20 p. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010007 (consulté le 12/06/2021)

Rahimikhoob, H.; Sohrabi, T. & Delshad, M. 2020. *Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions*. In: Irrigation Science. *Vol,* 38. No, 4. 11 p. 389-400. https://doi.org/10.1007/s00271-020-00680-5 (consulté le 15/07/2021)

Reis, M.G.D. & Ribeiro, A. 2020. *Conversion factors and general equations applied in agricultural and forest meteorology*. In: Agrometeoros. *Vol,* 27. No, 2. 32 p. 227-258. https://doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26527 (consulté le 03/05/2021)

Salazar, R.; López, I.; Rojano, A.; Schmidt, U.; Dannehl, D. 2015. *Tomato yield prediction in a semi-closed greenhouse*. In: Acta Horticulturae. Vol, 1107. 8 p. 263-270. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1107.36 (consulté le 20/07/2021)

Sánchez-Hermosilla, J.; Páez, F.; Rincón, V.J.; Pérez-Alonso, J. 2013. *Volume application rate adapted to the canopy size in greenhouse tomato crops*. In: Scientia Agricola. Vol, 70. No, 6. 7 p. 390-396. https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600003 (consulté le 27/04/2021)

Takakura, T. 1993. *Climate under cover: digital dynamic simulation in plant bio-engineering*. 155 p. Springer Science + Business Media, B.V. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1658-9 (consulté le 08/07/2021)

Uddin, J.; Smith, R.; Hancock, N.; Foley, J. 2014. *Evaluation of sap flow sensors to measure the transpiration rate of plants during canopy wetting and drying*. In: Journal of Agricultural Studies. Vol, 2. No, 2. 15 p. 105-119. https://doi.org/10.5296/jas.v2i2.6134 (consulté le 27/04/2021)

Valdés, H.; Ortega-Farias, S.; Argote, M.; Leyton, B.; Olioso, A.; Paillán, H. 2004. *Estimation of evapotranspiration over a greenhouse tomato crop using the Penman-Monteith equation*. In: Acta Horticulturae. Vol, 664. 6 p. 477-482. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.664.60 (consulté le 02/07/2021)

Villarreal-Guerrero, F.; Kacira, M.; Fitz-Rodríguez, E.; Kubota, C.; Giacomelli, G.A.; Linker, R.; Arbel, A. 2012. *Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse*

*cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging*. In: Scientia Horticulturae. Vol, 134. 12 p. 210-221. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.016 (consulté le 13/06/2021)

Wang, L.; He, X. & Luo, D. 2020. *Deep reinforcement learning for greenhouse climate control*. In: 2020 IEEE International Conference on Knowledge Graph (ICKG). 7 p. 474-480. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICBK50248.2020.00073 (consulté le 17/07/2021)

Yan, H.; Huang, S.; Zhang, C.; Gerrits, M.C.; Wang, G.; Zhang, J.; Zhao, B.; Acquah, S.J.; Wu, H.; Fu, H. 2020. *Parameterization and application of Stanghellini model for estimating greenhouse cucumber transpiration*. In: Water. Vol, 12. No, 2. 14 p. https://doi.org/10.3390/w12020517 (consulté le 09/07/2021)

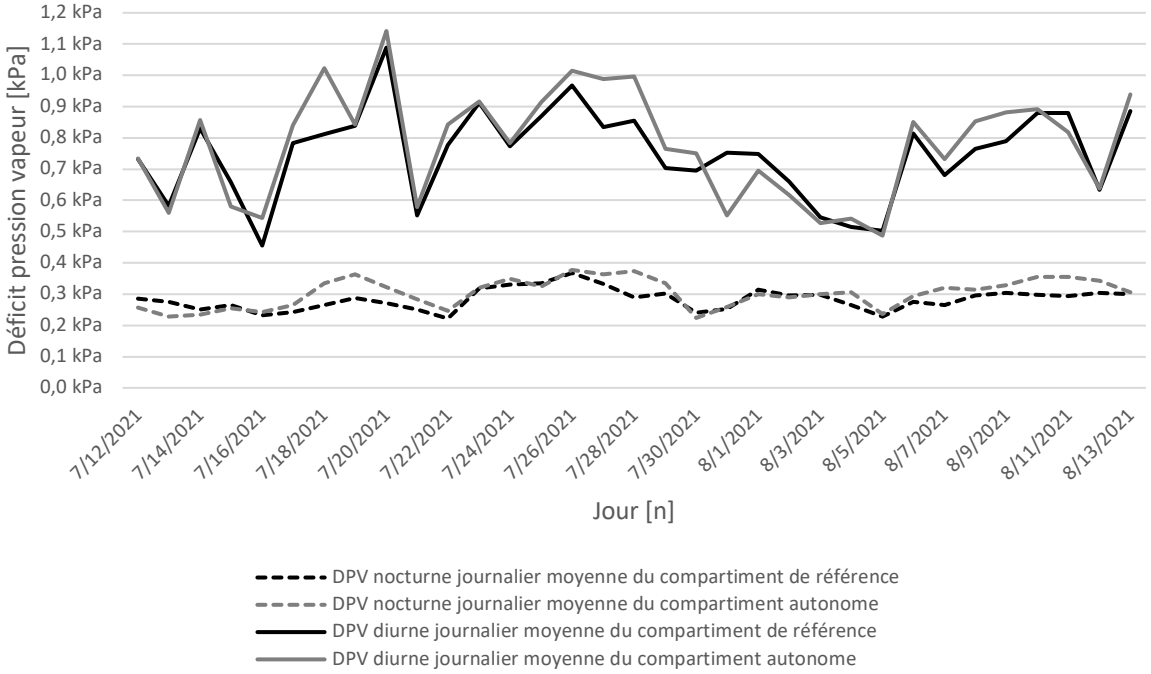
Rivera-Zamarripa, J.R.; López-Cruz, I.L.; Castillo-Salazar, J.A.; Ramírez-Arias, J.A. 2013. *Comparación de tres modelos para estimar la transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero*. In : Terra Latinoamericana. Vol, 31. No, 1. 13 p. 9-21. http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n1/2395-8030-tl-31-01-00009.pdf (consulté le 19/06/2021)

Zhang, D.; Du, Q.; Zhang, Z.; Jiao, X.; Song, X.; Li, J. 2017. *Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer*. In: Scientific Reports. Vol, 7. No, 43461. 11 p. https://doi.org/10.1038/srep43461 (consulté le 15/07/2021)

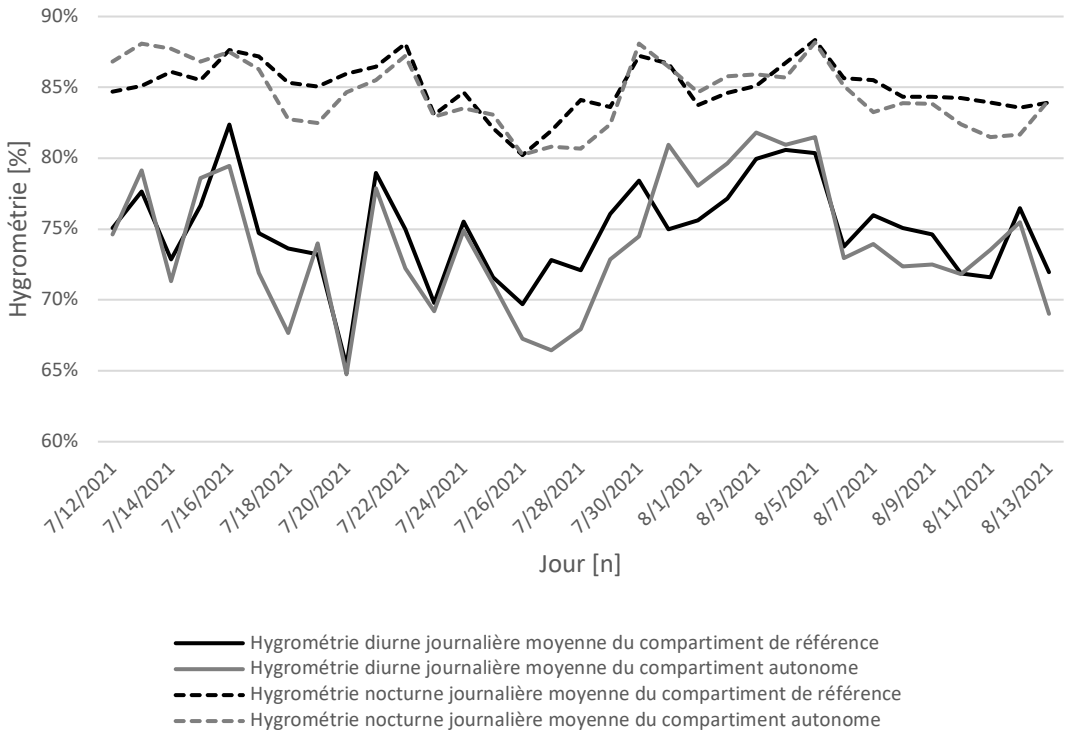
Zhang, L. & Lemeur, R. 1992. *Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions*. In: Agricultural and Forest Meteorology. Vol, 58. No, 3-4. 10 p. 209-228. https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90062-9 (consulté le 15/07/2021)

# Annexes

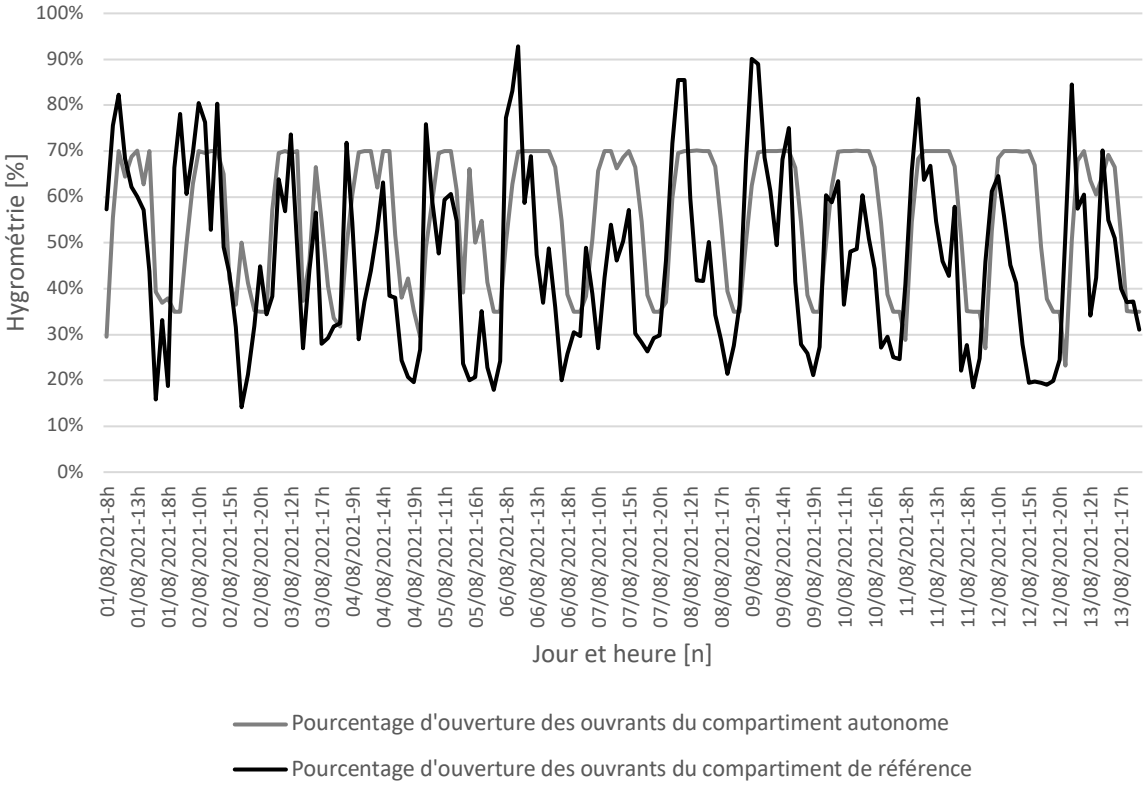
## ANNEXE 1 : ÉVOLUTION DU DEFICIT PRESSION VAPEUR JOURNALIER EN PERIODE DE JOUR ET DE NUITS POUR LES DEUX MODALITES DE REGULATION CLIMATIQUE DURANT LA PERIODE DE LA DEUXIEME EXPERIMENTATION



## ANNEXE 2 : ÉVOLUTION DE L'HYGROMETRIE JOURNALIERE EN PERIODE DE JOUR ET DE NUITS POUR LES DEUX MODALITES DE REGULATION CLIMATIQUE DURANT LA PERIODE DE LA DEUXIEME EXPERIMENTATION



## ANNEXE 3 : ÉVOLUTION DES CONSIGNES DES OUVRANTS D'AERATION HORAIRE POUR LES DEUX MODALITES DE REGULATION CLIMATIQUE DURANT LES DEUX DERNIERES SEMAINES DE LA DEUXIEME DE L'EXPERIMENTATION



## ANNEXE 4 : DEFINITION DES PARAMETRES DES DEUX MODELES DE TRANSPIRATION ETUDIES

### Modèle 1

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho C_p VPD}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

(Gong et al. 2017; Monteith 1965)

| | | |
|---|---|---|
| $\lambda$ | Chaleur latente de vaporisation | J.kg-¹ |
| $ET$ | Taux d'évapotranspiration | mm.t-¹ |
| $\Delta$ | Pente de la courbe de saturation | kPa.K-¹ |
| $Rn$ | Rayonnement net | W.m-² |
| $G$ | Flux de chaleur du sol | W.m-² |
| $C_p$ | Chaleur massique de l'air | J.kg-¹.K-¹ |
| $\rho$ | Densité de l'air | Kg.m-³ |
| $VPD$ | Déficit pression vapeur | KPa |
| $r_c$ | Résistance aérodynamique | s.m-¹ |
| $r_s$ | Résistance de canopée ou de surface | s.m-¹ |
| $\gamma$ | Constante psychrométrique | kPa.K-¹ |

### Modèle 2

$$\lambda ET = R_n - h(T_a - T_f)$$

(Villarreal-Guerrero et al. 2012)

| | | |
|---|---|---|
| $Rn$ | Rayonnement net | W.m-² |
| $h$ | Coefficient de transfert de chaleur par convection | W.m-².K-¹ |
| $T_a$ | Température de l'air | °C |
| $T_f$ | Température de feuille | °C |

### *Chaleur latente de vaporisation*

$$\lambda = 10^3(2500 - 2{,}37.T)$$

| | | |
|---|---|---|
| $\lambda$ | Chaleur latente de vaporisation | J.kg-¹ |

| | | |
|---|---|---|
| $T$ | Température de l'air | °C-¹ |

(Reis & Ribeiro 2020)

***Pente de la courbe de saturation***

$$\Delta = \frac{2504.\exp\left(\frac{17{,}27.T}{T+237{,}2}\right)}{(T+237{,}3)^2}$$

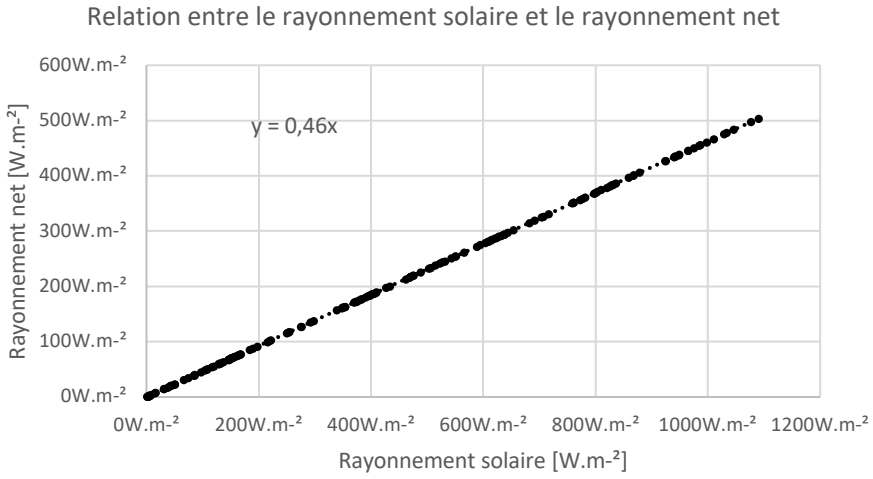
| | | |
|---|---|---|
| $\Delta$ | Pente de la courbe de saturation | kPa.K-¹ |
| $T$ | Température de l'air | °C-¹ |

(Allen et al. 1998)

***Rayonnement net***

Le rayonnement net a été calculé via la procédure proposé par la FAO en 1998 : (Allen et al. 1998) et en appliquant un coefficient de transmission des parois de 60%.

Sa relation finale avec le rayonnement solaire, mesuré sur le site de San Miguel est résumé ici :




***Flux de chaleur du sol***

Le flux de chaleur du sol dans le cas d'une culture hors sol en pains et considéré comme nul.

***Chaleur massique de l'air***

La chaleur massique de l'air est généralement considérée comme une valeur constante.

$$C_p = 1013\, j.kg^{-1}.°C^{-1}$$

(Allen et al. 1998)

***Densité atmosphérique***

$$\rho_a = \frac{P}{R_a.T_{Kv}}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\rho$ | Densité atmosphérique | Kg.m-$^{3}$ |
| $P$ | Pression atmosphérique | kPa |
| $R_a$ | Constante spécifique de l'air | J.kg-$^{1}$.K-$^{1}$ |
| $T_{Kv}$ | Température virtuelle en degré Kelvin | °K |

$$P = 101{,}3\left(\frac{293 - 0.0065z}{293}\right)^{5{,}26}$$

| | | |
|---|---|---|
| $z$ | Altitude (2077m dans cette étude) | m |

$$R_a = 287.06j.kg^{-1}.K^{-1}$$

$$T_{Kv} = 1{,}01(T + 273)$$

| | | |
|---|---|---|
| $T$ | Température ambiante | °C |

(Allen et al. 1998)

***Pression partielle de vapeur d'eau***

$$e_{sat}(T) = 0.6108\exp\left(\frac{17{,}27.T}{T + 237.3}\right)$$

| | | |
|---|---|---|
| $e_{sat}(T)$ | Pression de vapeur saturante à la température T | kPa |
| $T$ | Température de l'air | °C |

(Allen et al. 1998)

***Pression partielle de vapeur d'eau***

Comme :

$$HR = 100.\left(\frac{e_a}{e_{sat}(T)}\right)$$

(Allen et al. 1998)

Et que l'humidité relative est mesurée, alors :

$$e_a = \frac{HR.e_{sat}(T)}{100}$$

| | | |
|---|---|---|
| $e_a$ | Pression partielle de vapeur d'eau | kPa |
| $HR$ | Humidité relative | % |
| $e_{sat}(T)$ | Pression saturante à la température T | kPa |

***Humidité absolue***

L'humidité absolue peut également être connue grâce aux termes évoqués précédemment et via l'équation suivante :

$$HA = \frac{\varepsilon . e_{sat}(T)}{P_{atm} - e_{sat}(T)}$$

(Morille 2012)

Cette équation permet de connaitre l'humidité absolue de l'air à saturation. Pour connaitre l'humidité absolue de l'air dans les conditions climatiques actuelles il suffit de remplacer le terme de pression saturante par le terme de pression partielle :

$$HA = \frac{\varepsilon . e_a}{P_{atm} - e_a}$$

| | | |
|---|---|---|
| $HA$ | Humidité absolue | g.kg-¹as |
| $\varepsilon$ | Ratio de masse molaire vapeur d'eau/air sec : 62.2% | % |
| $e_a$ | Pression partielle de vapeur d'eau | kPa |
| $P_{atm}$ | Pression atmosphérique | kPa |

(Morille 2012)

***Déficit pression vapeur***

Le déficit pression vapeur est la différence de pression entre la pression saturante de la température T et de la pression partielle de vapeur d'eau actuelle :

$$VPD = e_{sat}(T) - e_a$$

| | | |
|---|---|---|
| $VPD$ | Déficit pression vapeur | kPa |
| $e_{sat}(T)$ | Pression saturante à la température T | kPa |
| $e_a$ | Pression partielle de vapeur d'eau | kPa |

***Résistance de canopée***

La résistance de canopée intervenant dans l'équation de la résistance de surface développée est définie de la sorte :

$$r_c = \frac{r_{sT}}{LAI_e}$$

| | | |
|---|---|---|
| $r_c$ | Résistance de canopée | s.m-¹ |
| $r_{sT}$ | Résistance stomatique | s.m-¹ |
| $LAI_e$ | LAI actif | m².m-² |

(Gong et al. 2017)

***Résistance stomatique***

A partir de l'expérimentation réalisée au travers de l'étude, la résistance stomatique a pu être défini comme une fonction du rayonnement solaire Rs (et non du rayonnement net). La relation entre $r_{st}$ et Rs a été défini par la fonction exponentielle ci-après :

$$r_{sT} = 23{,}21\exp\left(\frac{1021{,}06}{R_s + 365{,}71}\right)$$

| | | |
|---|---|---|
| $r_{sT}$ | Résistance stomatique | s.m-¹ |
| $R_s$ | Rayonnement solaire | W.m-² |

(Gong et al. 2017)

***LAI actif***

La part du LAI considérée comme active pour la tomate est définie dans l'étude selon la catégorisation suivante :

| Valeur de $LAI$ | Valeur de $LAI_e$ |
|---|---|
| LAI≤2 | LAI |
| 2<LAI<4 | 2 |
| LAI≥4 | LAI/2 |

(Gong et al. 2017)

***Résistance aérodynamique***

$$r_a = \frac{\rho C_p}{2hLAI}$$

| | | |
|---|---|---|
| $r_a$ | Résistance aérodynamique | s.m-¹ |
| $\rho$ | Densité de l'air | Kg.m-³ |
| $C_p$ | Chaleur massique de l'air | J.kg-¹.K-¹ |
| $h$ | Coefficient de transfert de chaleur par convection | W.m-².K-¹ |
| $LAI$ | Leaf Area Index | m².m-² |

(Gong et al. 2017; L. Zhang & Lemeur 1992)

***Coefficient de transfert de chaleur par convection***

Le coefficient de transfert de chaleur par convection peut être calculé de la sorte :

$$h = 0{,}37.\left(\frac{k_c}{d_c}\right).(G_r + 0{,}692{R_e}^2)^{1/4}$$

| | | |
|---|---|---|
| $k_c$ | Conductivité thermique de l'air | W.m-².K-¹ |

| | | |
|---|---|---|
| $d_c$ | Caractéristiques des dimensions d'une feuille | m |
| $G_r$ | Nombre de Grashof | SD |
| $R_e$ | Nombre de Reynolds | SD |

(Gong et al. 2017)

***Caractéristiques de dimensions d'une feuille***

Les caractéristiques de dimensions d'une feuille se formulent via cette équation :

$$d_c = \frac{2}{1/L + 1/W}$$

| | | |
|---|---|---|
| $d_c$ | Caractéristiques des dimensions d'une feuille | m |
| $L$ | Longueur d'une feuille | m |
| $W$ | Largeur d'une feuille | m |

(Gong et al. 2017)

***Nombre de Grashof***

Le nombre de Grashof permet de calculer la convection libre de l'air circulant dans la serre et à proximité des feuilles :

$$G_r = \frac{\beta g {d_c}^3 \left|T_f - T_a\right|}{\nu^2}$$

| | | |
|---|---|---|
| $\beta$ | Expension thermique de l'air ($3{,}315.10^{-3}.K^{-1}$) | $K^{-1}$ |
| $g$ | Accélération gravitaire ($9{,}80665 m.s^{-2}$) | $m.s^{-2}$ |
| $d_c$ | Caractéristiques des dimensions d'une feuille | m |
| $T_f$ | Température de feuille | °C |
| $T_a$ | Température de l'air | °C |
| $\nu$ | Viscosité cinématique de l'air (16.4.10-6 $m^2.s^{-1}$) | $m^2.s^{-1}$ |

(Gong et al. 2017)

***Température de feuille***

Avant la phase de calibration, une estimation basique de la température de feuille a été calculé de la sorte :

$$T_f = T_a - 1$$

***Nombre de Reynolds***

Le nombre de Reynolds caractérise le rapport entre la vitesse d'un fluide, ici l'air, et sa viscosité :

$$R_e = \frac{ud_c}{\nu}$$

| | | |
|---|---|---|
| $R_e$ | Nombre de Reynolds | SD |
| $u$ | Vitesse du vent | m.-¹ |
| $d_c$ | Caractéristiques des dimensions d'une feuille | m |
| $\nu$ | Viscosité cinématique de l'air (16.4.10-6 m².s-¹) | m².s-¹ |

***Vitesse de vent***

Avant la phase de calibration, la vitesse du vent faible en serre, a été fixé 0,1m.s-¹.

***Constante psychrométrique***

La constante psychrométrique, généralement fixée à 0,065 kPa.°C-¹ peut également être calculée :

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda}$$

| | | |
|---|---|---|
| $C_p$ | Chaleur massique de l'air | J.kg-¹.K-¹ |
| $P$ | Pression atmosphérique | kPa |
| $\varepsilon$ | Ratio de masse molaire vapeur d'eau/air sec : 62.2% | % |
| $\lambda$ | Chaleur latente de vaporisation | J.kg-¹ |

## ANNEXE 5 : PRESENTATION DES PARAMETRES MODIFIES APRES CALIBRATION DES MODELES

### *Vitesse de vent*

$$u = \frac{v}{A_c} + f_V . V_V$$

| | | |
|---|---|---|
| $u$ | Vitesse de vent | m.s-¹ |
| $\Phi$ | Flux de ventilation | m³.s-¹ |
| $A_c$ | Surface du pignon du pignon | m² |
| $f_V$ | Fonctionnement de la ventilation | % |
| $V_V$ | Vitesse de ventilation | m.s-¹ |

(Joe Acquah et al. 2018)

$$\Phi = \frac{L_0 C_d T_e}{3 g \Delta T}\left[\left(\frac{g\Delta T}{T_e}h + C_w U_e^2\right)^{\frac{3}{2}} - (C_w U_e^2)^{\frac{3}{2}}\right]$$

| | | |
|---|---|---|
| $L_0$ | Longueur d'ouvrant | m |
| $C_d$ | Effet de décharge du vent | - |
| $T_e$ | Température extérieure | °K |
| $g$ | Accélération gravitationnelle | m².s-¹ |
| $h$ | Hauteur de l'ouvrant | m |
| $C_w$ | Coefficient d'effet de vent | - |
| $U_e$ | Vitesse de vent extérieure | m.s-¹ |

(Joe Acquah et al. 2018)

La présence de filet anti-insecte sur les ouvrant nous à pousser à corriger le paramètre de hauteur des ouvrants. En dessous de 20% d'ouverture, l'aération est considérée comme nulle. Au-delà, nous avons appliqué un coefficient de transmission de l'air de 40%, nous permettant de simuler leur effet brise vent.

### *Température de feuille*

La température de feuille a été modélisée avec une fonction utilisable durant la période de jour et une fonction pour la période de nuit. Nous avons mobilisé ce dernier calcul dès lors que le rayonnement solaire était inférieur à 10W.m-².

| | | |
|---|---|---|
| Température de feuille (Jour = Rs > 10W.m-²) | $T_0 = T_a + 1{,}67 R_s - 0{,}25\frac{VPD}{\gamma}$ | $°C$ |
| Température de feuille (Nuit Rs < 10W.m-²)) | $T_0 = T_a - 0{,}1\left(\frac{VPD}{\gamma}\right)$ | $°C$ |

(Joe Acquah et al. 2018)

***Résistance de canopée et résistance stomatique***

Il nous a semblé utile d'intégrer le paramètre du déficit pression vapeur dans l'estimation de la résistance stomatique et de canopée :

$$r_c^c = \frac{r_{sTmin} f(R_s) f(DPV)}{LAI_e}$$

| | | |
|---|---|---|
| $r_{sTmin}$ | Résistance stomatique minimale (définit à 60s.m-¹) | s.m-¹ |
| $f(R_s)$ | Fonction du rayonnement solaire | W.m-² |
| $f(DPV)$ | Fonction du déficit pression vapeur | kPa |

$$f(R_s) = 1 + \left(\exp\left(a_1(R_s - b_1)\right)\right)^{-1}$$

$$f(DPV) = 1 + a_2 \exp\left(b_2(DPV - DPV_{max})\right)$$

| | | |
|---|---|---|
| $a_1$ | Coefficient empirique (-0,0006) | SU |
| $b_1$ | Coefficient empirique (260,673) | SU |
| $a_2$ | Coefficient empirique (1,121) | SU |
| $b_2$ | Coefficient empirique (-1,137) | SU |
| $DPV$ | DPV de l'air ambiant | kPa |
| $DPV_{max}$ | DPV maximum fixé à 1 kPa | kPa |

(Gong et al. 2019)

***Résistance aérodynamique***

$$r_a = \frac{1{,}5 d_c}{2LAI.D_H.\left(\frac{u d_c}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\nu}{D_H}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

| | | |
|---|---|---|
| $D_H$ | Diffusivité thermique de l'air | m².s-¹ |
| $d_c$ | Caractéristiques des dimensions d'une feuille | m |
| $u$ | Vitesse de vent | m.s-¹ |
| $\nu$ | Viscosité cinématique de l'air (16,4.10-6 m².s-¹) | m².s-¹ |

(Valdés et al. 2004)

## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### Confidentialité

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible [1].

Date et signature du **maître de stage** [2] : 18.10.2021
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

**A la fin de la période de confidentialité,** sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

### Droits d'auteur

L'auteur[3] **Nom Prénom : Herment Paul**
autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☒ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☒ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'**auteur** : 15/10/2021

### Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'**enseignant** :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.
(2) Signature et cachet de l'organisme
(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études
(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

| | |
|---|---|
| l'institut Agro<br>agriculture • alimentation • environnement | Diplôme : Ingénieur<br>Spécialité : Horticulture<br>Spécialisation / option : Ingénierie des productions et des produits de l'horticulture<br>Enseignant référent : Mathilde Briard |

| | |
|---|---|
| Auteur(s) : Paul Herment<br>Date de naissance* : 06/11/1996 | Organisme d'accueil : Red Sun Farms®<br>Adresse : El Moral del Puerto, 37885 San Miguel de Allende, Guanajuato, Mexique<br>Maître de stage : François Habasque |
| Nb pages : 45 Annexe(s) : 13 | |
| Année de soutenance : 2021 | |

Titre français : Évaluation de l'influence d'un système de serre autonome sur une culture de tomates et développement d'outils de modélisation de surface foliaire et de transpiration

Titre anglais : Assessment of the influence of an autonomous greenhouse system on a tomato crop and development of leaf surface and transpiration modeling tools

Pour évaluer l'influence d'une nouvelle solution de régulation climatique, deux expérimentations ont été mises en place dans les serres de production de l'entreprise d'accueil. La première nous a permis de mesurer l'indice de surface foliaire de 10 plantes dans un compartiment piloté de manière autonome, et de 10 autres provenant d'un compartiment de référence. Les surfaces foliaires y ont été plus élevées dans le compartiment autonome. Les données collectées nous ont permis de développer un outil d'estimation de cet indice, simple, non destructif et dix fois plus rapide qu'une méthode de mesure classique. La deuxième expérimentation nous a permis d'étudier la consommation en eau des plantes des deux modalités de régulation. La consommation en eau des plantes y a été plus élevée dans le compartiment autonome alors que les apports en eau y ont été plus faibles. La faiblesse de la stratégie d'irrigation du compartiment de référence est à l'origine de pertes en eau importantes. Les rendements observés, semblables entre les deux modalités, ont montré une meilleure efficience de l'utilisation de la ressource en eau sous la régulation autonome, où il a été possible de produire plus de fruits avec un même volume d'eau apporté. La plus forte consommation en eau des plantes du compartiment autonome semble principalement due à leur surface foliaire plus élevée, potentiellement favorisée par des consignes de températures de nuit plus haute. Les données de consommation mesurées nous ont permis de tester deux modèles de transpiration qui ont montré une belle qualité de production sur certaines plantes.

To evaluate the influence of a new climate control solution, two experiments were set up in the production greenhouses of the host company. In the first experiment, we measured the leaf area index of 10 plants in an autonomously controlled compartment, and of 10 others from a reference compartment. The leaf areas were higher in the autonomous compartment. The data collected allowed us to develop a tool for estimating this index, which is simple, non-destructive and ten times faster than a conventional measurement method. The second experiment allowed us to study the water consumption of plants under the two climate control solutions. The water consumption of the plants was higher in the autonomous compartment, while the water input was lower. The weak irrigation strategy of the reference compartment resulted in high water losses. The similar yields observed between the two modalities showed a better efficiency of the use of water resource under the autonomous regulation, where it was possible to produce more fruit with the same volume of water supplied. The higher water consumption of the plants in the autonomous compartment seems to be mainly due to their higher leaf area index, potentially favored by higher night temperature set points. The measured consumption data allowed us to test two transpiration models which showed a good estimation quality on some plants.

Mots-clés : Serre, autonome, transpiration, LAI, modélisation, régulation

Key Words: Greenhouse, autonomous, transpiration, LAI, modelling, climate control

* *Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*