

Mémoire de Fin d'Etudes

CONFIDENTIEL

Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)

Parcours : Qualité des Productions Spécialisées (QPS)

Année universitaire 2017-2018

Magestan, Utilisation de modèle pour une conduite de culture de tomates hors sol optimisée : Optimisation de la modélisation de la croissance de fruit

Par : Emilie LEGAST

Soutenu à Angers le 19 septembre 2018

Maître de stage : Vincent TRUFFAULT

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu l'occasion d'échanger lors de ce stage pour leur accueil chaleureux.

Je remercie Monsieur Eric BRAJEUL de m'avoir accueilli au sein du centre du CTIFL de Carquefou.

Merci à Vincent TRUFFAULT, mon maître de stage, qui m'a permis de participer à ce projet passionnant, pour ses conseils et sa disponibilité.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Irène GERONDEAU, Denis LODA et Nathalie MAVEL, pour leur aide précieuse, leur accueil, et toutes les connaissances qu'ils ont partagés. Ainsi que tous les membres de l'équipe serre (Philippe, Yannick, Philippe, Amandine, Jordan, Maryse,...) pour leur patience et leurs conseils.

Je voudrais aussi remercier Nicolas GILARDI et Gilles VERCAMBRE, acteurs de Magestan qui m'ont fourni une aide importante dans l'analyse des résultats climatiques et de flux de sève.

Antoine CHEMINANT, Emilienne ASSEA et Marie PETIT, mes collègues stagiaire qui m'ont accompagné durant ces 6 mois de stage.

Merci à Pierre-Emmanuel BOURNET pour son aide à la rédaction de ce rapport.

Enfin merci à tous, pour ces 6 mois riches en bons moments.



ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e) Legast - Emilie,
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un
document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation
des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer
toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Legast - Emilie'.

Cet engagement de non plagiat doit être inséré en première page de tous les rapports, dossiers, mémoires.

Table des matières

I- Introduction	1
1. Présentation du programme Magestan	2
2. Modélisation de la culture sous serre	3
Modélisation du climat.....	4
Modélisation de la croissance du fruit	6
Gestion climatique en réponse au besoin de la culture.....	8
II- Problématiques	9
III- Matériel et Méthodes	10
1. Serres d'expérimentation.....	10
2. Protocole expérimental.....	11
Analyses des paramètres de flux de sève et diamètre de tige.....	11
Analyse de l'hétérogénéité climatique.....	12
Calcul des degrés heure.....	12
Modélisation de la croissance des fruits	13
Protocole d'expérimentation de l'impact de la ventilation sur le climat.....	15
IV- Résultats	16
1. Analyse des mesures des flux hydrique	16
2. Description de l'hétérogénéité climatique de la serre.....	17
3. Impact du gradient vertical sur le développement des fruits	18
4. Maitrise de l'hétérogénéité de la serre.....	21
V- Discussion	22
1. Analyse des mesures des flux hydrique	22
2. Hétérogénéité climatique de la serre.....	24
VI- Conclusion	28
Bibliographie.....	29
Sitographie.....	30
Annexe	i
Annexe I : Comparaison des durées de croissance des fruits entres les différents scénarios testés	i
Annexe II- Tableau résumé des expérimentations effectuer dans les serres	i
Annexe III- Tableau des dates de début de croissance et récoltes des différents bouquets des serre 12 et 13	ii

Glossaire

Ch = Unité de degrés heure

PAR = Photosynthetically active radiation

LVDT = Linear variable differential transformer

ANN = Artificial neural networks

CFD = computational fluid dynamics, en français, mécanique des fluides

Sommaire des figures

Figure 1 Schéma représentant l'architecture du programme Magestan.....	3
Figure 2 Schéma décrivant un réseau de neurone simple	4
Figure 3 : Illustration d'une serre d'expérimentation	10
Figure 4 Schéma de la position des capteurs dans les serres (flux de sève en vert et diamètre de tige en noir)	11
Figure 5 Localisation des 27 capteurs de température fournis par Wi6lab dans la serre 13...	12
Figure 6 Schéma représentant une plante dans la serre.....	12
Figure 7 Schéma de l'architecture du modèle de Fanwoua. Les rectangles représentent les processus subi par les cellules, les losanges la règle de décision et les trois grandes phases sont représentées par le changement de couleur (Fanwoua et al., 2013)	13
Figure 8 Schéma représente le modèle décrit par Fanwoua et al., 2013.....	14
Figure 9 : Graphiques représentant, en A le flux de sève (en violet- axe principal des ordonnées) et le diamètre de tige (en vert- axe secondaire), en B le diamètre de tige (axe secondaire) et le déficit hydrique de la serre (en bleu - axe principale) et en C le flux de sève et le rayonnement PAR (jaune- axe principale) et la température ambiante (orange- axe secondaire) sur la période du 22 au 23 mai 2018.	16
Figure 10 Représentation des corrélations reliant les différents paramètres climatiques de la serre avec les flux de sève et le diamètre de tige.	17
Figure 11 Graphique représentant les corrélations entre les mesures de températures sur une période de 24 jours du mois de mai à juin 2018. Les numéros des axes représentent les capteurs ayant effectués la mesure (3,6,9,12,15,18,21,24 et 27 au niveau haut, 1,4,7,10,13,16,19,15 au niveau bas et 2,5,8,11,14,17,20,23 et 26 au niveau intermédiaire).....	17
Figure 12 Graphique de comparaison des températures au niveau de l'apex (haut- courbe verte) et des fruits mature (bas- courbe orange) de la plante. La courbe des moyennes des différences est rattachée à l'axe vertical secondaire.....	18
Figure 13 Graphique des proportions des sommes de degrés heures reçus par les bouquets aux différents niveaux.....	19
Figure 14 Graphique représentant les masses des péricarpes simulés d'après le modèle de Fanwoua et al., 2013 sous différentes températures : la médiane des températures enregistrées dans les serres 12 et 13 en 2017 (gris), puis ces valeurs avec un et deux degrés de plus ou de moins.....	20
Figure 15 Représentation de la répartition des masses des péricarpes à différentes températures de croissance. L'axe de Y représente la masse du péricarpe en mg et l'axe de x les différentes modalités. Il y a quatre modalités avec un changement dans les températures aux différents niveaux de la serre. L'environnement témoin (S122017), baisse de la température au niveau bas (S12botcold), baisse au niveau intermédiaire (S12midcold), baisse du niveau intermédiaire jusqu'au niveau haut (S12midtopcold) et au niveau haut (S12topcolt).	20
Figure 16 Graphique illustrant les coefficients de régression entre les températures relevées dans les compartiments avec les températures et rayonnements extérieurs. Chaque point représente un capteur parmi les 27 utilisés dans la serre. Chaque couleur représente une hauteur : en bleu les capteurs haut, en orange ceux au niveau intermédiaire et en rouge ceux au niveau bas Trois modalités sont analysées, le témoin dont la ventilation est à 50% de capacité, celle où la ventilation est à 100% et celle où la ventilation est à 0%.	21
Tableau 1 Tableau de comparaison illustrant les degrés heure moyens, la somme de degrés heure et les temps de développement des fruits sur la plante en fonction de la serre relevé en 2017.....	-18-
Tableau 2 Tableau des valeurs moyennes de degrés heure enregistrés pour chaque bouquet dans le compartiment 12 et 13 en 2017.	-19-
Tableau 3 Résumé des moyennes et écart types des masses prédictes des péricarpes avec des changements de températures lors du développement.....	-20-

I- Introduction

La tomate est le légume le plus consommé en France. La production Française est de 624 600 tonnes de tomates fraîches par an (2016 FranceAgriMer), mais elle ne suffit pas à satisfaire la demande nationale. La culture de tomate représente un marché très important qui est en pleine expansion dans les régions de l'ouest et plus particulièrement le sud-ouest avec une augmentation des surfaces de production (augmentation de la surface de + 78% de 2011 à 2016). Ces cultures sont majoritairement produites sous serre avec 951.8 ha de serre chauffées (Grisey *et al.*, 2017) contre 379 ha en plein air (Chiron, 2017). Une grande partie d'entre elles est cultivée hors-sol.

La culture hors-sol sous serre chauffée est un type de production permettant de maîtriser les conditions environnementales d'une culture. Cette pratique culturale est aujourd'hui très utilisée en production de tomate en raison des nombreux avantages qu'elle offre, tel que la maîtrise climatique du milieu de production, le rendement régulier, une culture homogène et la production en forte densité. Ces caractères prennent une grande importance avec les enjeux actuels d'innovation et d'accroissement de la compétitivité de la filière. Une telle méthode de production peut être facilement adaptée en ville dans les fermes urbaines, sa maîtrise complète est donc indispensable pour son expansion. Ce type de culture est cependant difficile à mettre en place, car le climat extérieur a un impact important et la maîtrise de l'environnement de la serre passe par le contrôle de multiples paramètres. Un producteur peut agir sur ces paramètres par l'utilisation des équipements de la serre : chauffage, ventilation, ouvertures, etc. Ces équipements agissent chacun sur plusieurs paramètres environnementaux qui interagissent entre eux (température, hygrométrie,...). La serre est donc un système complexe.

La plupart du temps, la gestion du climat se fait par des mesures correctrices, pour se rapprocher au plus près des besoins de la plante selon les observations visuelles du producteur. Par exemple dans le cas de fortes températures, la mise en place des écrans, la fréquence d'irrigation et l'aération ne sont adaptés que selon l'expérience du chef de culture. Dans certains cas, un stress ne peut être détecté qu'après l'apparition de symptômes visibles. C'est dans le but d'assister cette gestion climatique que Cybeletech a initié le projet Magestan en partenariat avec l'INRA, le CTIFL et Wi6lab. Ce projet financé par FranceAgriMer a un double rôle. Le premier est d'apporter une aide pour les producteurs, afin qu'ils puissent mieux maîtriser l'environnement de la serre et avoir une meilleure gestion des paramètres de contrôle ; le second est de ne plus avoir à prendre de mesures correctives, mais plutôt d'anticiper les besoins de la plante grâce à une prédition précise et d'obtenir un haut niveau de performance agronomique.

Pour cela le projet Magestan se déroule en trois parties, la phase d'initiation, la calibration des modèles et la preuve de concept. Actuellement le projet est en dernière année d'élaboration ; les

modèles sont en phase d'ajustement et le programme en phase de développement. Dans le cadre de ce projet, le centre technique du CTIFL de Carquefou est l'une plateforme d'expérimentation. Les essais sont donc effectués dans les serres du centre et le personnel attaché au projet effectue les analyses des résultats et apportent leur expertise pour l'optimisation du modèle.

1. Présentation du programme Magestan

Le projet s'articule autour de quatre acteurs principaux qui participent au développement du programme :

L'entreprise à l'initiative du projet, Cybeletech est une entreprise française du domaine des technologies numériques qui développe et utilise des programmes mathématiques et des outils numériques pour la filière agricole. Les modèles mis aux points permettent de prédire des informations telles que le rendement et la croissance des plantes. Cette entreprise est le principal acteur du projet Magestan avec la création d'un nouveau type de modèle adapté à la serre. Avec l'équipe de l'INRA, ce sont les deux acteurs qui ont créé l'ensemble du programme informatique.

En effet, l'INRA d'Avignon participe au projet et apporte les modèles décrivant le fruit (qualité et rendement) et la plante (modèle plante 3-D). Les modèles de fruit créés simulent les processus avec une grande précision, en intégrant les flux de carbone, flux d'eau, pression osmotique, mais aussi les taux de sucres solubles, la concentration en acide malique et acide citrique. L'adaptation et la calibration de ces modèles nécessitent une base de données importante sur les paramètres environnementaux de la serre et les plantes.

Pour cela l'entreprise WI6labs a fourni un réseau d'une trentaine de capteurs pour le projet (27 capteur de température, 1 de CO₂, 4 dendromètre de tige,...). Ces capteurs sont connectés sur un réseau sans-fil LoRa permettant l'envoi des données à Cybeletech en direct. L'utilisation de capteurs sans-fil facilite leur dispersion dans la serre et leur nombre n'est plus limité par l'accès à l'électricité.

Le centre du CTIFL de Carquefou et les serres de l'EARL Transon sont les lieux des mesures expérimentales. Le CTIFL est le centre technique de l'interprofession des fruits et légumes. Cet organisme a pour mission la recherche et la mise en place de projet et le partage des résultats obtenus, avec pour objectif l'amélioration des connaissances et du savoir-faire de la filière. Les projets menés au CTIFL font souvent appel à de nombreux acteurs. Pour ce projet, deux serres de 320 m² sont utilisées pour les mesures physiologiques et morphométriques (mesure d'architecture de la plante et de morphologie du fruit) et des paramètres environnementaux.

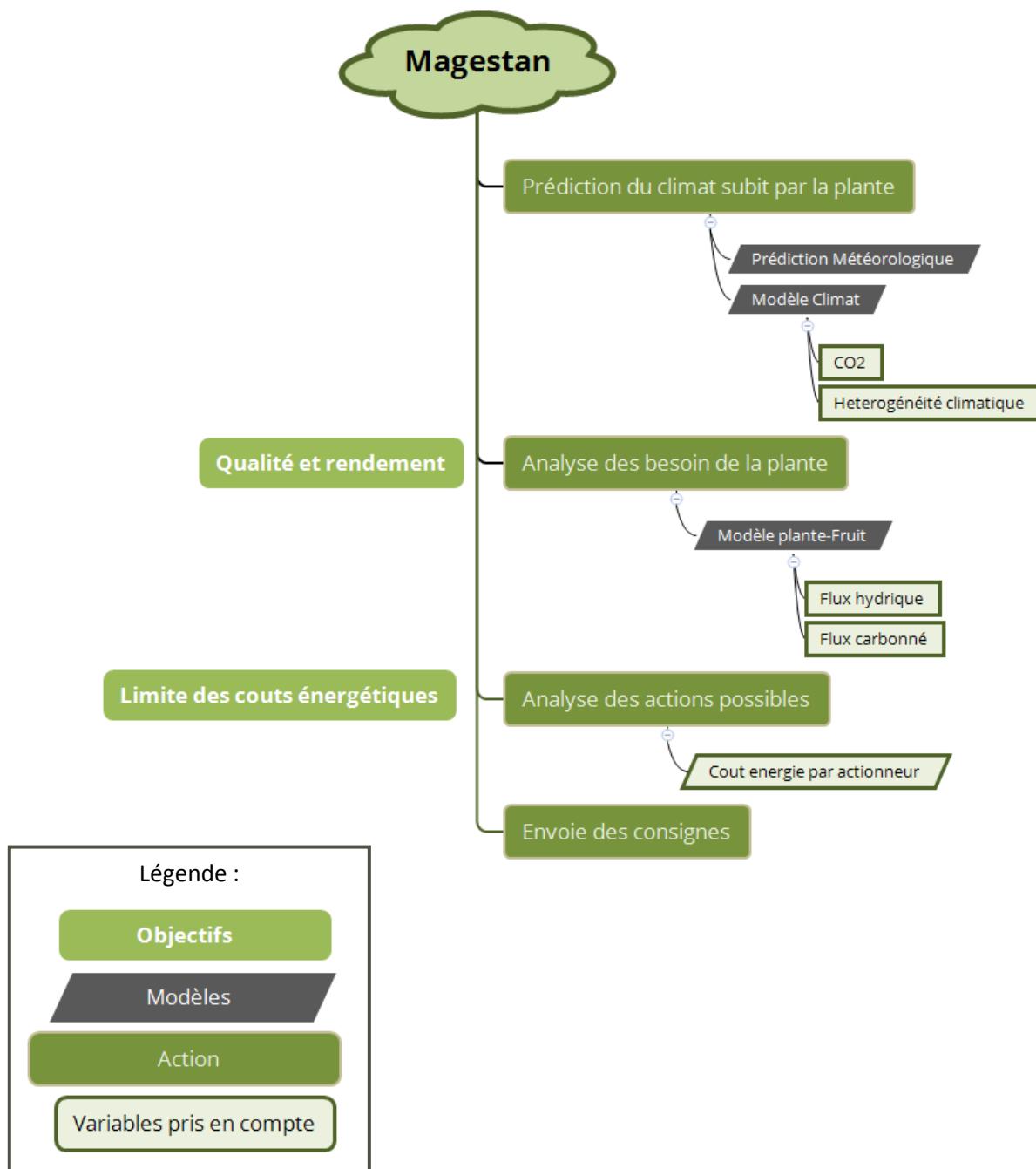


Figure 1 Schéma représentant l'architecture du programme Magestan coût

2. Modélisation de la culture sous serre

La serre est un système complexe, dont la gestion requiert l'intégration d'un grand nombre de paramètres. Actuellement la gestion du climat se fait à l'aide d'un système correctif : des points de références sont donnés au système de pilotage qui ajuste les actionneurs en fonction de l'environnement actuel. Ce système permet de se rapprocher du climat optimal mais nécessite d'adapter manuellement les consignes régulièrement en fonction de la demande des plantes ou du changement météorologique (exemple des écrans gérés différemment en hiver et en été).

Depuis quelques années, les chercheurs se penchent sur des systèmes plus autonomes dont les prédictions permettraient d'agir en amont. Les paramètres tels que le rayonnement, la température, l'hygrométrie et le CO₂ sont étudiés afin de comprendre leurs évolutions en fonction des influences extérieures et des actions de gestion climatique. Ces paramètres ont fait l'objet de nombreux modèles de prédiction, comme celui développé par Boulard *et al.*, 2017, qui peuvent avoir un rôle d'aide à la décision sur la gestion climatique. La modélisation du climat de la serre peut également servir à la prédiction de la dépense énergétique. En effet, c'est une problématique très étudiée, avec de nombreux modèles tel que celui de Van Beveren *et al.*, 2013 qui permet d'optimiser la ventilation et le chauffage de la serre pour diminuer l'énergie utilisée.

Tout au long de la culture le climat de la serre est influencé par l'environnement extérieur mais aussi par les besoins de la plante. Ces besoins changent en fonction de la période de culture, du stade de la plante et des objectifs de production. Pour cela l'impact des paramètres climatiques sur le développement de la plante est beaucoup étudié. Le but étant de prédire les besoins de la plante afin d'y répondre avant l'apparition de stress, et ainsi optimiser la production. Il existe plusieurs types d'approche : une approche physiologique telle que les modèles SUGAR de (Liu *et al.*, 2007) ou TOMGRO (Jones *et al.*, 1991) ou plus architecturale comme celui de Fanwoua *et al.*, 2013.

Il existe de nombreux modèles décrivant les paramètres climatiques d'une serre ou la plante, mais peu de modèle prenant en compte l'ensemble de la serre (plante + climat). C'est dans l'objectif de combler ce manque que le programme Magestan a été conçu : Il pourra s'appuyer sur une simulation du développement de la plante pour prédire ces besoins afin de connaître les paramètres climatiques optimaux. En parallèle, un modèle climatique prédira les actions à entreprendre pour ces objectifs en fonction de l'environnement extérieur. Cela en association avec un algorithme qui a pour rôle de calculer et limiter les dépenses énergétiques. Ce programme est donc constitué de plusieurs modèles fonctionnant ensemble afin de modéliser la serre le plus précisément possible (Figure 1) :

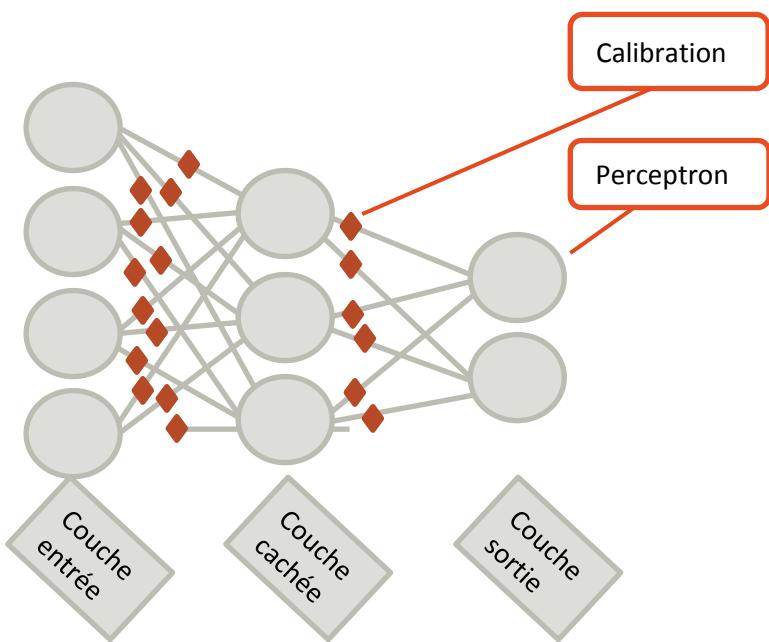


Figure 2 Schéma décrivant un réseau de neurone simple

- Le modèle climat est développé par l'équipe Cybeletech comprenant, un sous-modèle CO₂ et un sous-modèle décrivant l'hétérogénéité climatique ; ainsi le climat sera modélisé pour chaque hauteur de la serre, avec la température, le CO₂ et l'hygrométrie.
- Le modèle plante issu des modèles proposés par l'INRA sont adaptés au programme Magestan par Cybeletech. Le principale modèle utilisé est « Sugar » qui a été développé par M. Génard et ses collaborateurs. D'autres modèles décrivant de nouveaux paramètres de la qualité et du développement du fruit sont en cours.

Modélisation du climat

Afin de la modéliser le climat dans le programme Magestan deux principaux types de modèles ont été étudiés :

- **Les modèles paramétriques non linéaires à boîte noire :**

Ce type de modèle repose sur l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels (ANN). Le réseau de neurone est un système composé de très nombreux éléments interconnectés, permettant de résoudre un problème de manière autonome à partir d'une base de données. Ces éléments qui sont communément nommés neurone sont des perceptrons (figure 2). Ce sont des algorithmes mathématiques de classification des données.

Un réseau de neurone est donc un réseau de perceptrons répartis en plusieurs couches, où chacune d'elles correspondent à un ensemble de perceptrons ayant la même fonction (figure 2). La couche d'entrée comprend tous les neurones qui accueilleront les valeurs entrantes, leur nombre est donc souvent égal au nombre de valeurs entrantes choisies. La couche cachée est une couche intermédiaire qui n'est pas en contact avec l'extérieur, elle remplit un rôle d'intermédiaire. Le nombre de perceptrons choisi pour cette couche est adaptable en fonction du réseau choisi. Enfin la couche de sortie contient les perceptrons qui délivreront la ou les réponses au problème posé (3Blue1Brown, 2017).

Ce type de modèle utilise le « Deep Learning », c'est-à-dire qu'après une phase « d'autocalibration » le modèle peut prédire correctement des résultats en fonction des données entrantes. La calibration du modèle est l'application de correction sur les différentes connexions. A l'échelle du réseau entier, le nombre de connexions étant très important, le nombre de corrections l'est également. L'apprentissage est donc effectué sur une plus longue période. Dans le cas d'une calibration par rétropropagation, l'apprentissage est exécuté jusqu'à ce que la courbe d'erreur du modèle ne soit plus croissante (Sylvain BARTHELEMY, 2000).

Ce type de réseau est très utilisé dans de nombreux domaines (reconnaissance d'image par exemple). Un modèle climatique réalisé avec ce système évite de réaliser la description de

l'environnement de la serre pour l'écriture du modèle. Dans notre cas, en caractérisant les données de l'environnement extérieur et du climat ambiant de la serre, il pourra prédire les actions à entreprendre afin d'obtenir ou maintenir le climat optimum. Les modèles en ANN ont déjà fait l'objet de recherche dans la modélisation climatique. Par exemple, dans le cas de Dariouchy *et al*, 2009 ou le climat interne de la serre est prédict sur 7 jours d'après le rayonnement, l'hygrométrie, le vent (vitesse et direction), et la température extérieure. Cette méthode est bénéfique car elle sera adaptative à différentes serres grâce au système de « Deep-Learning ». Cependant, elle requiert une grande base de données ainsi qu'un long temps d'apprentissage.

- **Les modèles explicatifs :**

Ce sont des modèles dynamiques qui décrivent l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans le compartiment modélisé (échange d'énergie et flux de masse). Cette approche se divise entre les modèles globaux et les modèles de climat distribué. Les modèles CFD qui sont les plus courants, sont des modèles de climat distribué. Par exemple, le modèle de Heuvelink est un modèle qui prédict la transmission de rayonnement dans la serre (Heuvelink *et al.*, 1995). Ce type de modélisation est très utilisé pour décrire l'environnement de la serre (Bougoul *et al.*, 2007; T. Boulard *et al.*, 1995; Bournet *et al.*, 2010). Ce modèle est très précis, car il est construit pour un environnement ciblé et prend en compte un grand nombre de paramètres (Cunha, 2003). Il permet une modélisation fiable de l'environnement de la serre et des paramètres testés. Cependant, il nécessite la caractérisation complète du compartiment ciblé ce qui le rend difficilement transposable d'une serre à une autre.

Dans le cas du modèle climatique du programme Magestan, les temps de calcul du programme doivent être faibles, pour assurer une réaction optimisée à la minute et de nouvelles consignes chaque heure. De plus, le modèle choisi doit être facilement adaptable à différents environnements (localisation et type de serre). La modélisation paramétrique non linéaire est donc la plus intéressante pour sa rapidité de calcul et son adaptabilité. Le programme est encore en cours de développement par Cybeletech. Il s'articulera en plusieurs sous-modèles comprenant la simulation du climat de la serre à partir des influences extérieures et des hétérogénéités et la gestion du CO₂.

Composantes du modèle climat Magestan

Le développement du modèle climat Magestan est actuellement toujours en cours. L'objectif de ce programme est d'obtenir une prédiction au plus proche du climat réel. Ainsi, la modélisation du climat inclut la prise en compte des hétérogénéités climatiques afin que les actions de gestion climatique favorisent l'homogénéité de production. En effet, au sein d'un compartiment, les variables climatiques (température, hygrométrie,..) sont distribuées inégalement selon la densité de plantation, le brassage de l'air, ce qui crée des hétérogénéités climatiques (Boulard *et al*, 2017). Afin de perfectionner le modèle, cette hétérogénéité doit être étudiée ; les températures doivent être

analysées afin de connaître leur répartitions, mettre en avant des gradients, ainsi que connaître l'impact des différences de températures sur la croissance de la plante et le développement des fruits semble être le facteur le plus descriptif de l'hétérogénéité et elle est également sensible aux paramètres météorologiques. La teneur en dioxyde de carbone dans la serre fait également l'objet d'une étude menée par Cybeletech. Un sous-modèle sera associé au programme afin de prendre en compte ce paramètre. Celui-ci est complexe car la teneur en CO₂ dans la serre est influencée par différentes sources : les échanges extérieurs, la respiration et la photosynthèse des plantes, la nature du CO₂ injecté (provenant de la condensation des fumées de la chaudière ou d'une source de CO₂ pure sous forme liquide). Le modèle doit donc piloter deux actionneurs, la quantité de CO₂ provenant de la chaudière et du CO₂ liquide. La chaudière fournit le chauffage de la serre et ses fumées sont récupérées pour être utilisées dans la serre. Ainsi le CO₂ liquide ne sert qu'en appoint lorsque la quantité fournie par la chaudière n'est pas suffisante ou lorsqu'elle n'est pas fonctionnelle. Ces deux sous modèles sont nécessaires afin de décrire le climat du compartiment précisément. Si la modélisation du CO₂ est déjà établie, celle de l'hétérogénéité climatique demande encore la compréhension de la distribution de la température dans la serre.

Modélisation de la croissance du fruit

La modélisation de la croissance du fruit de tomate fait l'objet de nombreuses recherches depuis des années. Elle a pour but de comprendre les besoins de la plante afin d'obtenir un rendement optimal, en fonction d'une gestion climatique et de prédire le potentiel de développement du fruit en fonction des ressources disponibles. La plupart des modèles de croissance du fruit décrivent les processus physiologiques intervenant au sein de la plante durant le développement du fruit. Parmi les nombreux modèles, il existe deux programmes principaux qui sont toujours actuellement travaillés : TOMGRO et SUGAR. Ces programmes sont des modèles phares qui sont en constantes évolutions avec l'ajout de différents composants par de nombreux chercheurs.

Les modèles TOMGRO ont pour objectifs principaux d'aider la gestion climatique en prédisant la capacité de production de la plante selon un environnement donné. Le premier modèle créé, décrit la croissance des fruits et le rendement obtenu à partir des données climatiques (J. W. Jones et al., 1991). Pour cela, il utilise des données descriptives de l'architecture de la plante afin de calculer la force de puits disponible pour le transport du carbone, ainsi que les ressources carbonées stockées. Les données d'entrées relatives à la plante sont : le nombre de feuille, le nombre de tige principale, le nombre de fruit, la masse sèche des feuilles, la masse sèche des tiges, la masse sèche des fruits et le LAI, et les données climatiques entrantes sont le rayonnement PAR, la température ambiante et la concentration de CO₂ du compartiment. Après quelques améliorations, ce modèle est utilisé comme constituant d'un outil d'aide à la décision (DSS, *decision support system*). Pour cela, il est tout d'abord

adapté à un programme de Matlab, SIMULINK, puis associé à deux autres programmes ; HYTODMOD et OptVPD. Le premier, HYTODMOD (*HYdroponic TOMato Decision Model*) est un outil d'aide à la décision qui conseille sur la gestion climatique de la serre avec pour but d'identifier les actions de gestion nécessaire afin d'obtenir un rendement et une qualité optimale (El-Attal, 1995). Des paramètres climatiques sont analysés par cet outil (EC et pH de la solution nutritive, température ambiante de la serre, température racinaire et pourcentage d'humidité) pour cinq processus clés dans la croissance de la plante. Ensuite il donne des consignes climatiques afin d'améliorer les conditions de ces processus. OptVPD est un second outil d'aide à la décision qui a pour rôle de calculer les conditions de VPD (Vapour-pressure deficit) optimales pour la culture. Il a été développé pour intégrer l'outil HYTOMOD (Shamshiri *et al.*, 2017). Ainsi l'alliance de ces trois outils permet la prise en compte à la fois du climat du compartiment, avec la température ambiante, l'humidité relative, et le VPD, et les processus physiologiques de la plante, pour proposer une gestion climatique en fonction des besoins de la plante. Cette gestion est donnée avec un objectif de rendement sous différentes conditions de lumière et à différents stades de croissance (R. Shamshiri *et al.*, 2018; R. R. Shamshiri *et al.*, 2017).

Le modèle SUGAR est issu des recherches menées principalement par les chercheurs de l'INRA d'Avignon, qui ont publié un nombre important d'articles à ce sujet ces dernières années (Bertin *et al.*, 2018). Dans ce cas, la modélisation de la croissance du fruit a pour but la description de l'ensemble des processus de développement du fruit. Elle a tout d'abord été construite par la simulation des flux hydriques. En 2007, les recherches de Liu *et al.*, ont permis de compléter ce modèle par l'ajout du flux de carbone jouant un rôle important dans la maturation. L'ajout de ce processus dans le modèle donne une précision sur l'intégration des molécules carbonées dans la maturation du fruit. Cependant ces derniers modèles représentaient le fruit sous forme d'une grande et unique cellule, et ne prennent pas en compte précisément les processus de développement tels que la division cellulaire ou l'endoréplication. En effet, la tomate passe par deux grandes phases lors de son développement ; une phase de multiplication cellulaire puis une phase d'endoréplication, correspondant à une multiplication de l'ADN cellulaire. Ces mécanismes complexes sont très bien représentés dans le modèle de (Fanwoua *et al.*, 2013). Par la suite, Baldazzi (Baldazzi *et al.*, 2017; Baldazzi *et al.*, 2013) a réuni tous ces modèles en combinant les processus de flux hydrique et de chargement en sucre du fruit avec les cycles de division et d'endoreplication.

Le modèle de croissance du fruit du programme Magestan est développé à partir du modèle SUGAR. Il fonctionne donc avec le modèle décrit par Liu *et al* en 2007, combiné à une adaptation du modèle SUGAR de Génard *et al.*. (1996). La croissance du fruit est décrite par le calcul des flux hydriques et du flux de carbone. L'accumulation des sucres solubles est prise en compte avec l'entrée du carbone dans le fruit. Le modèle intègre la transformation du saccharose en hexoses, la synthèse

des composées structuraux et le stockage des sucres sous forme d'amidon. Les données de concentration en sucres solubles préalablement calculées sont utilisées pour en déduire le potentiel osmotique du fruit. Les modèles croissance de fruit de Génard *et al.* (1996) et Sugar (Liu *et al.*, 2007) fonctionnent donc ensemble pour décrire le chargement du fruit en carbone puis en eau. L'estimation du taux de sucres dans la modélisation du fruit est un premier pas vers la prédiction de la qualité du fruit. Pour le compléter, un sous-modèle décrivant l'évolution des acides organiques dans le fruit est à venir dans le programme Magestan. Le ratio acides-sucres permettra alors de prédire la qualité du fruit sous l'une de ses modalités.

Cependant contrairement au modèle de type TOMGRO, les modèles utilisés pour la modélisation de la plante dans Magestan n'ont pas pour but l'aide à la gestion climatique. La description des processus de développement du fruit y est plus précise, mais il manque une interface avec le climat actuel du compartiment (pas de descripteur d'état de la plante dans les conditions actuelles). L'adaptation du modèle au programme Magestan nécessite donc une étude sur l'intégration de données entrantes qui autorise un lien vers les données climatiques.

Gestion climatique en réponse au besoin de la culture

Le programme Magestan est composé d'une modélisation climatique qui donne une indication future sur le climat de la serre. Une fois adapté au modèle plante, ces prédictions seront utilisées par le modèle plante afin de calculer les besoins climatiques de la plante. Cela nécessite une précision importante sur le développement du fruit avec une courte échelle de temps (heure par heure) ce qui explique l'utilisation du modèle SUGAR. Les consignes climatiques qui seront calculées devront ensuite être analysées en fonction des possibilités de gestion climatique et du cout en énergie. Ainsi, le programme doit permettre une gestion parfaite du climat pour un développement de la plante et une croissance des fruits optimum.

La présence d'une hétérogénéité climatique pourra être contrôlée par l'utilisation localisée des actionneurs. Mais il est dans un premier temps nécessaire de connaître son impact sur le développement des fruits (rendement et qualité) afin de savoir comment la moduler, puis de maîtriser le rôle des actionneurs afin de la maîtriser.

II- Problématiques

Le programme Magestan a pour objectif le pilotage d'une serre par un programme autonome. Celui-ci doit prédire les conditions climatiques de la culture, les besoins de la production et le coût des actions de gestions climatiques afin d'obtenir une conduite culturelle optimisée pour un bon rendement et un fruit de qualité.

La partie du programme, décrivant le développement du fruit, est utilisée pour connaître les besoins de la plante en fonction du climat. Cependant les modèles utilisés n'ont pas d'interface faisant le lien entre l'état de la plante et le climat. Parmi tous les paramètres descripteurs de la plante, le flux de sève et le diamètre de la tige sont des paramètres sensibles aux variations de l'environnement. Ces paramètres seront donc étudiés afin de mettre en avant l'impact des facteurs environnementaux sur leurs mesures.

La partie climatique a pour rôle de prédire le climat de la serre de manière précise. Pour cela, les développeurs ont pour projet de prendre en compte l'hétérogénéité climatique. Si cette problématique est bien décrite dans la littérature, son impact concret dans une serre de production hors sol est encore peu étudié. La répartition de la température dans le compartiment de la serre soulève plusieurs problématiques :

- La présence d'une hétérogénéité tout au long de l'année dans le compartiment et son contrôle par les différents actionneurs : L'hétérogénéité dans la répartition de la température de la serre est très visible durant les périodes de fortes chaleurs mais difficile à mettre en avant durant les périodes de début et fin de culture. Cette étude a donc pour but de démontrer la présence d'un ou plusieurs gradients tout au long de la culture, grâce au panel d'outil mis en place dans les serres d'expérimentation, afin d'aider le développement du sous-modèle décrivant l'hétérogénéité climatique. La ventilation serait l'un des leviers pouvant homogénéiser le climat dans la serre. Un essai climatique a donc été mis en place avec trois modalités afin de mesurer son impact sur la répartition des températures et de relier ces actionneurs au contrôle de l'hétérogénéité climatique dans le sous-modèle.
- Dans le cadre d'une production hors-sol sous serre, la conduite de culture est différente de celle habituellement étudiée. Ainsi le rôle du climat sur la plante et sur le développement des fruits est différent. La présence d'une hétérogénéité climatique aurait un impact conséquent sur le climat subi par la culture. Elle pose la problématique de la température reçue par le fruit. Celle-ci ayant un impact sur son développement, une disparité de répartition des températures au sein de la serre aurait un impact sur la production. Pourrait-on rendre cet impact positif pour le rendement et la qualité du fruit ? C'est dans l'objectif de répondre à cette question qu'une étude de la température



Figure 3 : Illustration d'une serre d'expérimentation

apportée aux fruits durant leur développement sera faite avec un suivi des degrés-jour reçus par les fruits et une modélisation de la croissance des fruits. Ces réponses alimenteront le modèle fruit, afin d'optimiser les températures reçues à chaque moment de la croissance du fruit.

III- Matériel et Méthodes

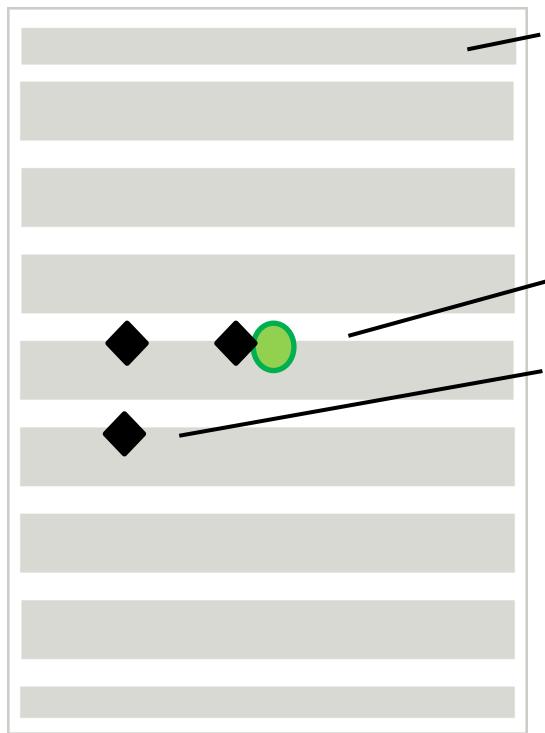
1. Serres d'expérimentation

L'étude porte sur une variété de tomate ronde, *Solanum lycopersicum L.* cv CLODANO. Ces plantes sont cultivées durant 10 mois (2017 : plantation le 14/12/16, première récolte le 2/03/17. En 2018 : plantation le 13/12/17, première récolte le 1/03/18) et peuvent mesurer jusqu'à 10m de long en culture palissée. Le travail de conduite des plantes consiste en un palissage par semaine (enroulement de la tige nouvellement créée autour du fil de culture et descente de la plante), et un effeuillage régulier pour conserver une vingtaine de feuilles sur la plante. La récolte à lieu deux fois par semaine afin de conserver une charge en fruits stable. Chaque pied mère est divisé en deux tiges, qui sont séparées de part et d'autre du rang. Il est communément réalisé une augmentation de la densité de plante dans la culture par la sélection d'un axillaire sous le 5^{ème} bouquet. Cette évolution permet d'accompagner l'augmentation du rayonnement lumineux au cours de la saison. Les compartiments étudiés ont une densité de 1,25 plant/m² avec 1 axillaire conservé toutes les 2 tiges.

Les serres utilisées pour l'expérimentation au CTIFL de Carquefou sont deux compartiments identiques de 320 m² et 6,40 m de hauteur (serre 12 et 13). Elles sont adjacentes l'une de l'autre et entourées par d'autres compartiments de part et d'autre de leurs façades Est et Ouest. Leurs façades Nord sont bordées par un couloir tandis que les façades Sud donnent directement sur l'extérieur. Les plants de tomate sont positionnés sur un substrat de laine de roche à environ 1 mètre du sol (figure 3). Deux ventilateurs par serre sont disposés sous les gouttières sur lesquelles sont déposés les cubes de substrat. La serre étant un milieu relativement clos, il est nécessaire de compenser la consommation du CO₂ par la plante lors du mécanisme de photosynthèse. Une injection de CO₂ se fait au niveau des gaines de ventilation. Un premier réseau de chauffage localisé au cœur de la végétation est suspendu dans chaque rang, à 1,5m du sol, au niveau des fruits en maturation. Un second réseau est positionné au niveau du sol sous la forme d'un rail. Le haut de la serre est équipé de deux écrans : l'un aux propriétés thermiques et l'autre servant d'ombrage. Les serres contiennent également 1 ruche de bourdons utilisés comme pollinisateurs.

La conduite de la culture est assistée par un outil de gestion climatique proposé par HortiMaX. Le logiciel Synopta est en effet relié à un grand nombre de capteurs et d'actionneurs qui sont pilotés manuellement ou automatiquement en suivant des consignes de fonctionnement. L'irrigation

Serre 12



Serre 13

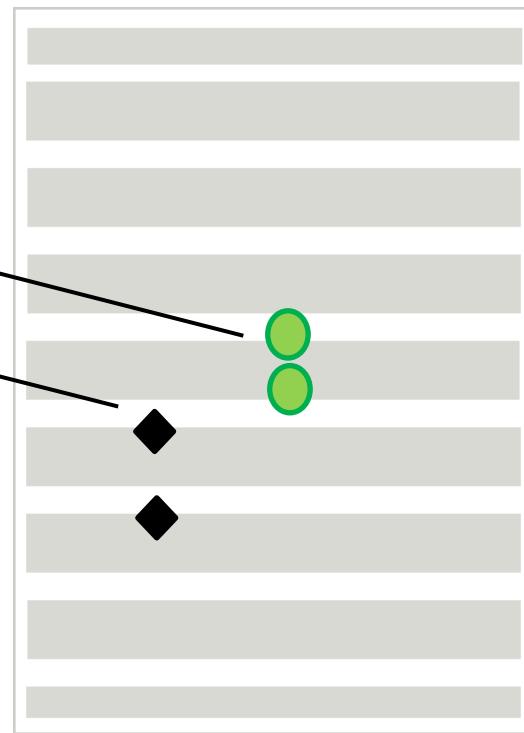


Figure 4 Schéma de la position des capteurs dans les serres (flux de sève en vert et diamètre de tige en noir)

fertilisante est faite en système recyclé, avec l'utilisation du logiciel Elotec. L'irrigation est également pilotée manuellement ou automatiquement avec des consignes.

2. Protocole expérimental

Analyses des paramètres de flux de sève et diamètre de tige

Le modèle TOMGRO utilise des données d'architectures de la plante qui permet au modèle de calculer les besoins de la plantes en fonction de son état (Shamshiri et al., 2018). Dans le cas de la modélisation proposée par Lui et al. (2011), aucune donnée entrante ne prend en compte l'état de la plante. Parmi les paramètres de la plante, les flux hydriques et d'assimilas dans la plante sont des paramètres physiologiques qui indiquent l'état de la plante ainsi que son activité. Ils décrivent donc l'état hydrique de la plante. Ils seraient donc utile au programme, pour une re-calibration en temps réel. C'est dans ce but qu'ils ont été analysés afin de connaitre leur réactivité par rapport à l'activité de la plante et aux changements de climat. Pour cela des mesures de diamètres de tige et de flux de sève ont été réalisées sur la plante durant la culture de 2018 (de mai à aout). Le projet ayant pour but d'être implanté dans tout type de serre, les capteurs utilisés pour la calibration du modèle doivent avoir une mise en place rapide et simple. La combinaison de ces deux capteurs de flux de sève et diamètre de tige répond parfaitement à ces critères. Avec une calibration préalable des capteurs effectués par une entreprise tierce, ils sont simples à mettre en place et les données facilement accessibles.

Le diamètre de tige est mesuré sur la tige de la plante au plus près du pied possible. Les capteurs sont positionnés dans les deux serres, ils sont 5 (3 en serre 12 et 2 en serre 13, figure 4), disposés des plantes différentes. Ce type de capteur (LVDT) enregistre la dilatation et la contraction de la tige qui sont directement liées aux flux hydriques dans la plante. Le principe du capteur est le même que celui du dendromètre de tige : il s'agit d'un capteur à piston dont l'aiguille est collée à la tige (figure 4). Ainsi chaque mouvement de la tige est relevé toutes les 2 minutes. Les capteurs utilisés ont tous une précision au micromètre.

Le flux de sève est mesuré sur la tige près du pied de la plante, sur des plantes différentes de celles utilisés par les LVDT, par 3 capteurs, 1 en en serre 12 et 2 en 13 (figure 4). Il existe plusieurs façons de mesurer le flux de sève, dans ce cas la mesure a été faite à partir d'une méthode dite de « Heat balance » ou bilan thermique. Ces capteurs sont composés d'une résistance qui chauffe la tige de manière continue et de sondes qui relèvent la température de part et d'autre de la résistance. Ainsi le flux de sève est calculé à partir des mesures des différentes sondes. Les mesures sont transmises à un pas de temps de 10 minutes en mV et V. Ce capteur est isolé par de nombreux matériaux afin que la mesure ne soit pas biaisée par la température ou le rayonnement extérieur.

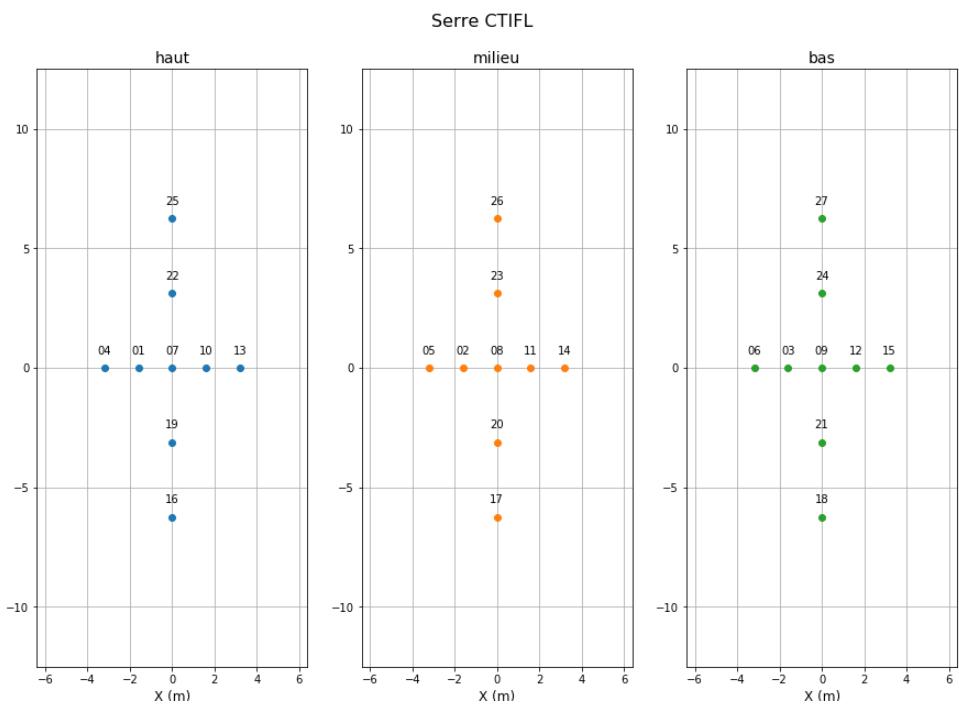


Figure 5 Localisation des 27 capteurs de température fournis par Wi6lab dans la serre 13

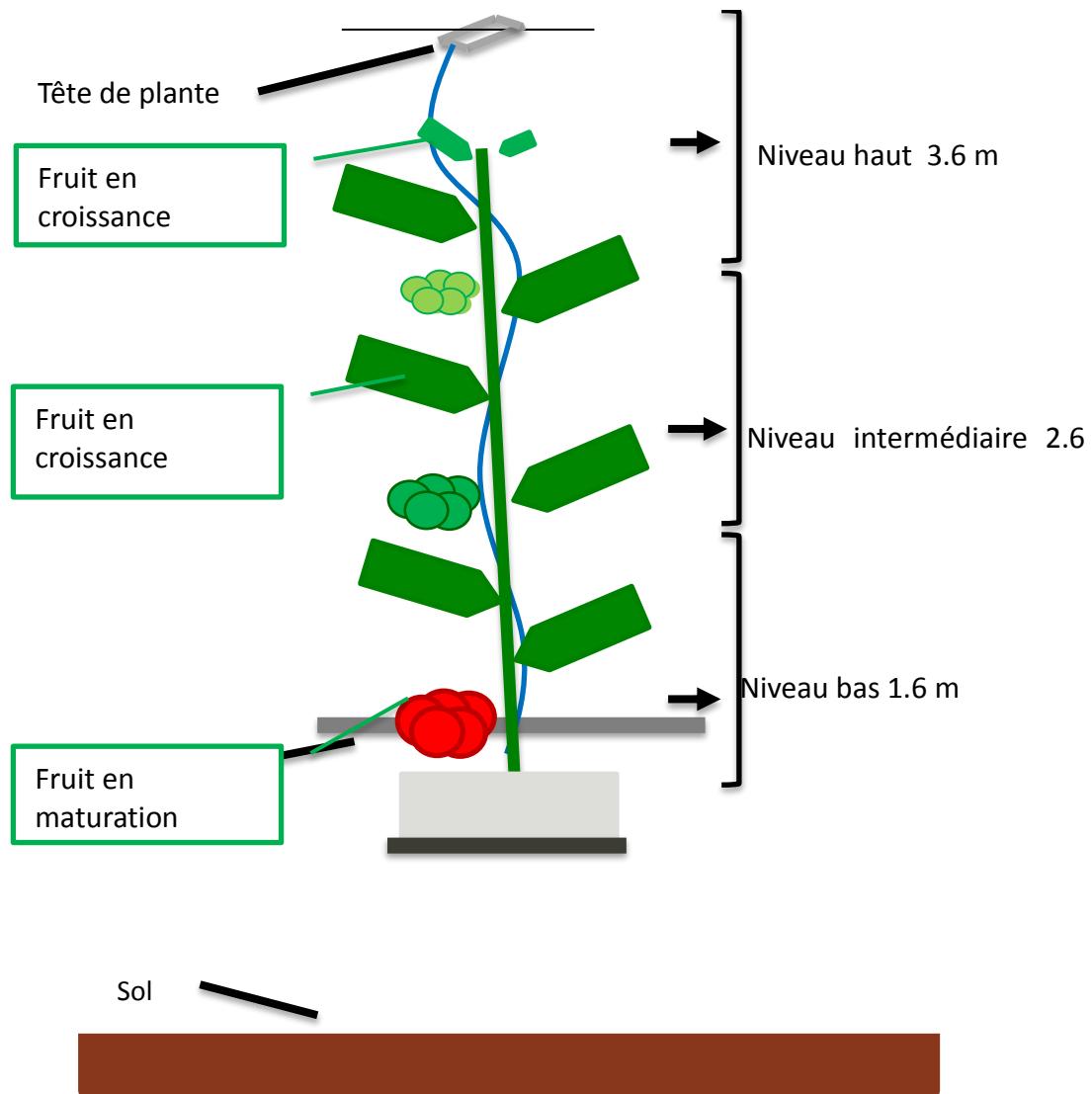


Figure 6 Schéma représentant une plante dans la serre

Ces mesures ont été analysées par comparaison aux mesures climatiques des serres. Une matrice de corrélation a été réalisée avec R afin de mesurer l'impact du climat sur ces paramètres physiologiques de la plante.

Analyse de l'hétérogénéité climatique

La présence d'une hétérogénéité de la répartition des températures est souvent décrite dans la littérature. Dans le cas des serres d'expérimentation, ce phénomène est facilement mesurable en période de forte chaleur, mais pour la prédition du climat subi par les plantes, sa caractérisation tout au long de la culture est nécessaire. Une description précise des gradients présents est nécessaire pour ensuite étudier son possible impact sur la croissance des fruits et sa maitrise.

La serre 13 a donc été étudiée sur deux années afin d'identifier la présence d'un gradient vertical et horizontal de températures (annexe 2). Les analyses de 2017 sont effectuées grâce à quatre capteurs ventilés présents dans chaque compartiment à 4 hauteurs différentes (1m, 1.8m, 3.5m et 4.5m en partant du sol, figure 5). En 2018, un réseau de 27 capteurs a été mis en place dans l'une des serres (serre 13 ; figure 5). Ces capteurs sont placés de manière à suivre la température reçue par les plantes à différentes hauteurs, en fonction de la croissance des fruits (figure 6). Ils enregistrent la température et l'hygrométrie par intervalle de 2 min. Les mesures enregistrées ont été utilisées pour caractériser l'hétérogénéité climatique du compartiment. Pour cela une matrice de corrélation a été faite à partir de données enregistrées par les capteurs sans fil sur une période de 24 jours durant mai à juin 2018. Afin de mettre en avant et d'amplifier les écarts entre les différentes mesures, la médiane des températures de tous les niveaux confondus a été soustraite aux données avant le calcul des corrélations sous R.

Dans un second temps, l'ensemble des températures relevées en 2017 par les capteurs ventilés a été moyenné afin de calculer la différence entre deux hauteurs.

Calcul des degrés heure

Les processus de développement du fruit tel que la division cellulaire, l'endo-replication et la maturation sont en partie corrélés à la somme de degrés reçus par le fruit. En présence d'une hétérogénéité climatique, le fruit ne recevrait pas une température homogène durant son développement (figure 6). Pour évaluer l'impact des conditions climatiques subies par le fruit durant son développement, le calcul des degrés sur un pas de temps donné est privilégié.

Nous avons utilisé le degré heure (somme de degrés pour une heure) plutôt que le degré jour (somme de degrés par jour). Cela rend possible la comparaison des résultats avec ceux existant dans la bibliographie. De plus en passant à l'échelle des heures plutôt que des jours, le pas de temps est

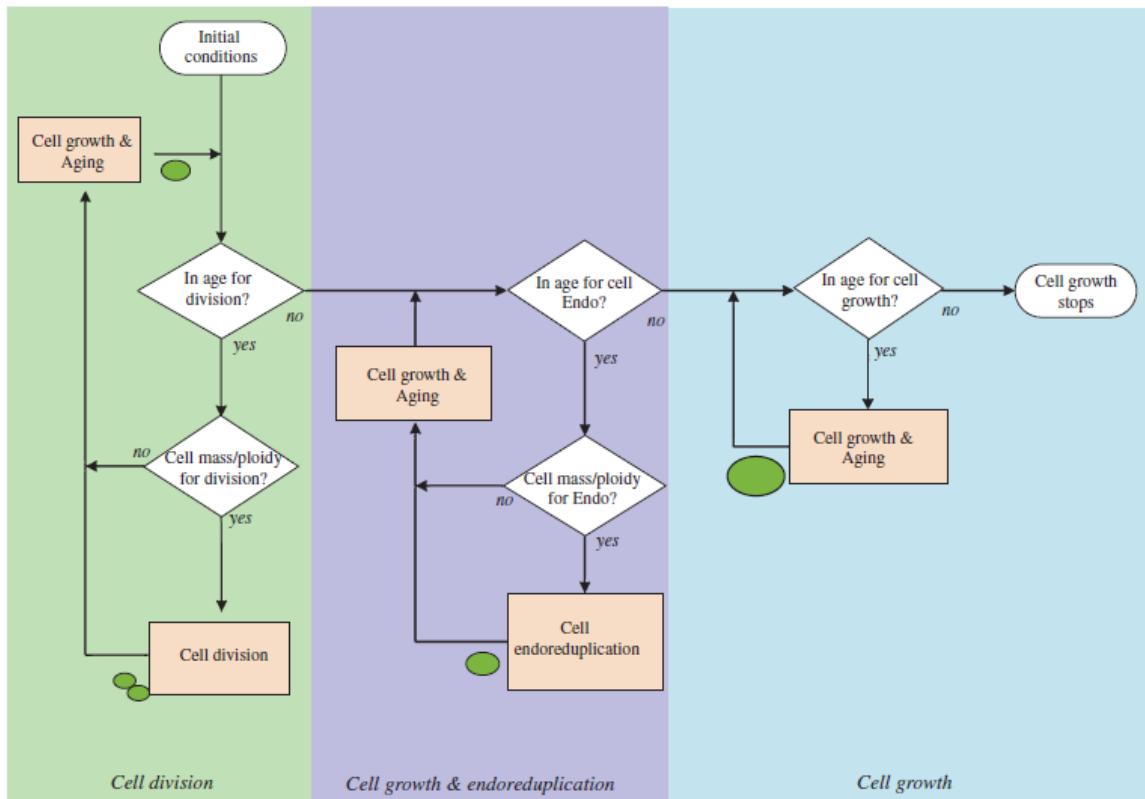


Figure 7 Schéma de l'architecture du modèle de Fanwoua. Les rectangles représentent les processus subis par les cellules, les losanges la règle de décision et les trois grandes phases sont représentées par le changement de couleur (Fanwoua et al., 2013)

plus court, donc les données sont plus représentatives. La durée de présence du fruit sur la plante, de sa formation à sa récolte est calculée à partir de l'observation du stade de floraison et du stade de récolte effectuée chaque semaine. Ce temps de développement est ensuite intégré pour calculer le nombre de degrés heure d'après le calcul suivant :

$$\text{Degrès heure} (Ch^\circ) = \text{Température moyenne horaire} - \text{Température de base}$$

où Température de base = 5.7 °C (Fanwoua et al., 2013).

Dans l'analyse suivante ce calcul est fait à partir de plusieurs sources de température horaire.

Les températures utilisées dans la première analyse (tableau 1) proviennent d'une seule source d'enregistrement de température, tandis que pour l'analyse suivante (tableau 2) la température de plusieurs zones a été enregistrée par les capteurs ventilés de température aux différents étages. Ainsi pour le calcul de la somme de degrés heure, il est additionné la somme des températures enregistrées durant le développement du fruit au niveau haut (environ 3,6 m), au niveau intermédiaire (2,6m), puis en niveau bas (1,6m). Ces températures sont issues de données relevées dans les serres 12 et 13 (annexe II).

Modélisation de la croissance des fruits

Afin d'étudier l'impact de l'hétérogénéité climatique sur le fruit, une expérimentation a été mise en place pour suivre l'impact des températures sur la croissance des fruits. Une expérimentation physique n'étant pas possible, l'utilisation d'un modèle a permis d'effectuer des tests virtuels. En effet, l'expérimentation est impossible car afin de mettre en place un tel projet pour confirmer une hypothèse d'effet climatique, il faut prendre en compte plusieurs paramètres :

- en ce qui concerne les installations nécessaires, pour que l'essai soit comparable à un témoin, les modalités doivent être mises en place au même moment. S'agissant de changement climatique, un compartiment ne peut être divisé en plusieurs modalités, les essais devraient donc se faire dans des compartiments différents. L'expérimentation nécessitera donc un compartiment par modalité.
- en ce qui concerne la durée de l'expérimentation, la croissance d'un fruit a une durée de plusieurs semaines donc l'expérimentation doit être faite sur une longue période. A cela il faut ajouter l'impact des conditions météorologiques extérieures sur les compartiments, il faut que l'expérimentation soit mise en place durant une culture complète.

Le temps et la structure de la culture n'ont donc pas permis d'effectuer cette expérimentation. La modélisation est donc une solution permettant de tester plusieurs hypothèses avant de débuter l'expérimentation plutôt coûteuse à mettre en place. Une modélisation de la croissance du fruit, de Fanwoua et al. (2013) , est donc utilisée pour vérifier les différentes hypothèses (figure 7).Ce modèle a été transcrit sur un script R, dont les résultats obtenus ont été validés avec les

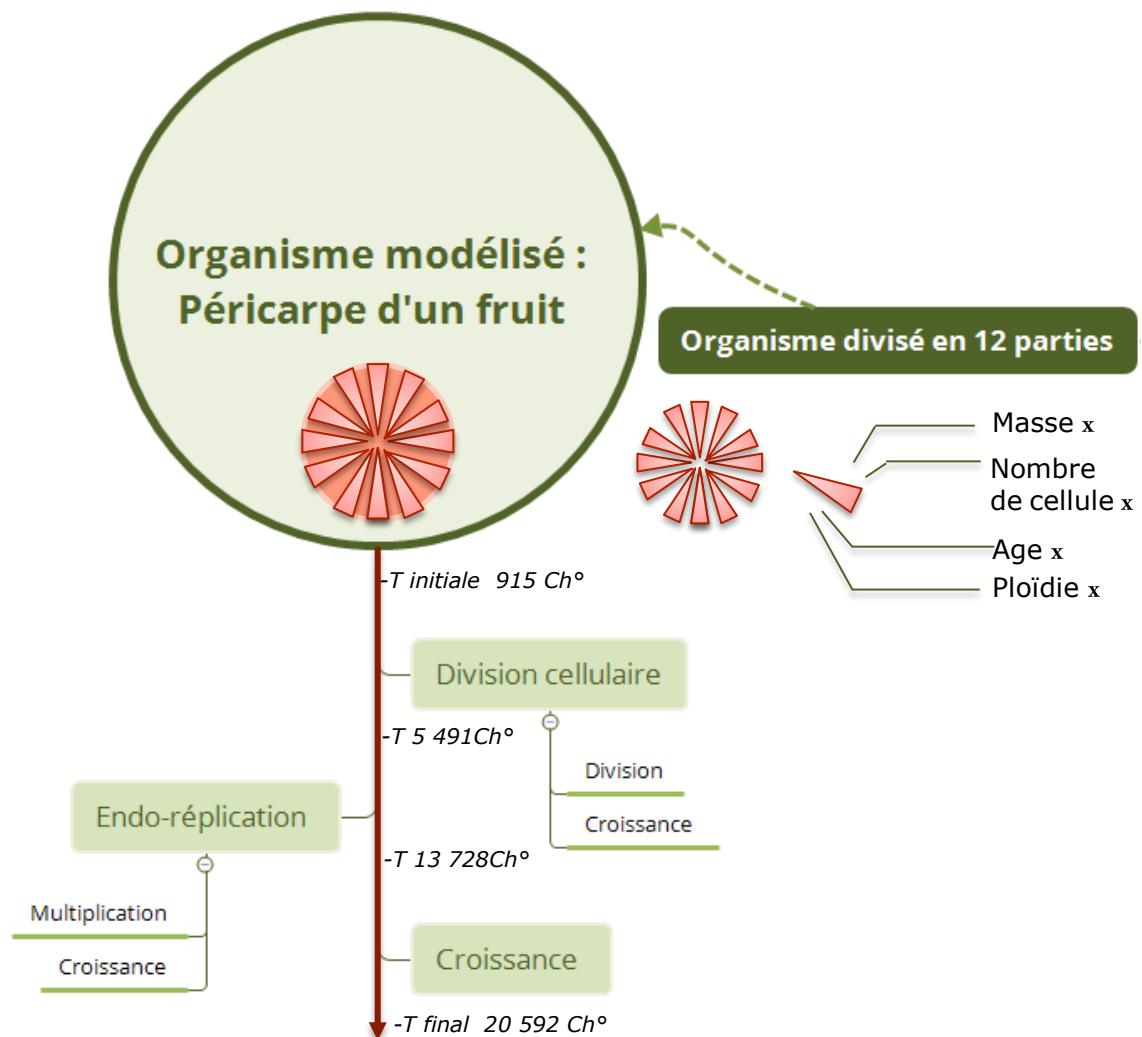


Figure 8 Schéma représentant le modèle décrit par Fanwoua et al., 2013

données obtenues par l'auteur. Ce modèle simule la croissance du péricarpe d'un fruit avec pour unique donnée entrante la température reçue (figure 8). Le péricarpe modélisé est divisé en 12 parties afin de prendre en compte les différences de comportement naturel de chaque fraction d'un fruit. Chacune de ces parties est composée d'un nombre de cellules précis qui ont un poids, un âge défini et une ploïdie définie (à droite de la figure). Elles « vieillissent » avec le déroulement du nombre de degrés heure (T initiale à 915 Ch° et T final à 20 592 Ch°). Elles vont croître et se diviser en fonction de la charge en sucre disponible. En effet à chaque phase notée « croissance », le potentiel de croissance des cellules est calculé en fonction du sucre disponible, de la surface d'échange avec le fruit, et la force de puits de ces cellules en compétition avec celle d'une autre partie. Les cellules modélisées subissent les processus de division cellulaire, d'endo-réPLICATION et de maturation (dernière phase de croissance). Ceux-ci ne sont réalisables que selon certaines conditions d'âge, de poids, de nombre et de ploïdie des cellules. Cet outil a donc été utilisé afin de tester différents scénarios de conduite climatique. Pour obtenir un échantillonnage représentatif de la croissance des fruits dans l'année, une modélisation de deux fruits par mois est effectuée durant la période de janvier à octobre 2017. Les scénarios de température prennent en compte l'hétérogénéité du climat de la serre. Chaque scénario est donc fait avec les enregistrements des températures sur trois hauteurs déjà définies avec le calcul des degrés heures : 3.6m, 2.6m et 1.6 m. Ainsi ils sont composés des températures reçues par le fruit en fonction de sa hauteur dans la serre.

La première problématique étudiée a été l'impact d'un changement global de température (à tous les niveaux du compartiment) sur la masse du péricarpe d'un fruit. Pour cela les températures définies précédemment ont été augmentées d'un ou deux degrés puis baissées d'un ou deux degrés sur l'ensemble de l'année. Les masses des péricarpes des fruits ont donc été modélisées selon une somme de degrés heure plus ou moins importante. Les différences entre les moyennes des masses obtenues ont été testées par une comparaison de moyenne non-paramétrique de Tukey ($\alpha=0.05$).

La seconde problématique analysée grâce au modèle est l'impact des changements de température selon les hauteurs dans la serre, avec un gradient vertical exacerbé de 1 ou deux degrés. Dans ce cas quatre scénarios ont été testés avec la température enregistrée dans le compartiment 12 pour témoin :

- Témoin (S122017)
- Une baisse de la température au niveau bas (S12botcold),
- Une baisse de la température au niveau intermédiaire (S12midcold),
- Une baisse de la température du niveau intermédiaire jusqu'au niveau haut (S12midtopcold),
- Une baisse de la température au niveau haut (S12topcold).

Pour chacune de ces hypothèses le modèle a été utilisé afin d'obtenir la masse du péricarpe, l'âge du fruit et sa durée de développement.

Protocole d'expérimentation de l'impact de la ventilation sur le climat

La ventilation est un des actionneurs participant au contrôle de la répartition de la température dans le compartiment. Dans les serres étudiées la ventilation est réglée à 50% de sa capacité pour un taux de renouvellement de 1.8 volumes /h. Cette consigne a été fixée d'après une étude de Stanghellini sur l'effet de la ventilation sur l'activité de la plante (Stanghellini, 1987). En effet, le passage d'air autour de la plante favorise l'entrée de CO₂ dans les stomates. L'objectif est de favoriser l'ouverture stomatique afin d'augmenter cette quantité de CO₂ entrant sans provoquer l'augmentation trop importante de la transpiration. Cette ouverture est régulée par la résistance stomatique (résistance mécanique des cellules de garde) et la résistance de la couche limite (fine couche d'interface entre la feuille et l'air ambiant). Le choix de gestion climatique du CTIFL est donc d'avoir une ventilation suffisamment importante afin de réduire la résistance de la couche limite, en prenant en compte la consommation énergétique de ventilation nécessaire pour y parvenir. Ainsi le taux de renouvellement de 2 volumes/h répond au mieux à ces critères.

Une expérimentation a été mise en place afin de connaître l'impact de cette ventilation sur la répartition de la température dans une serre dans le compartiment 13 (annexe 2). Pour cela la ventilation de la serre a été arrêtée durant 2 semaines (du 28 mai au 10 juin inclus) puis elle a été mise à 100% de sa capacité, avec un brassage des ventilateurs à 5 volume/ h durant 2 semaines (11 juin au 25 juin). Les consignes des ouvrants n'ont pas été modifiées durant l'expérimentation, seule la ventilation mécanique a été testée. Les températures enregistrées par les 27 capteurs de la serre durant la période de l'essai sont comparées aux températures relevées dans des conditions normales. La période témoin retenu est composée des jours précédent et suivant l'essai. Cependant les périodes d'analyse sélectionnées ne sont pas parfaitement homogènes : une baisse du rayonnement et de la température extérieure est constatée, ce qui représente un biais sur les résultats. Pour pallier à cela les données ont été échantillonnées en fonction de la moyenne de température extérieure journalière. Ensuite, seules les valeurs en période diurne ont été retenues. Puis les moyennes des températures journalières enregistrées par chaque capteur ont été comparées aux données de rayonnement et de température extérieure journalière par l'utilisation d'une régression linéaire. Ainsi une représentation graphique a été effectuée pour visualiser l'effet des différentes modalités de ventilation en prenant en compte l'impact des variables extérieures sur les températures enregistrées.

Titre : Comparaison du flux de sève (g.h⁻¹) et diamètre de tige (mm) avec le déficit hydrique, le rayonnement PAR et la température ambiante

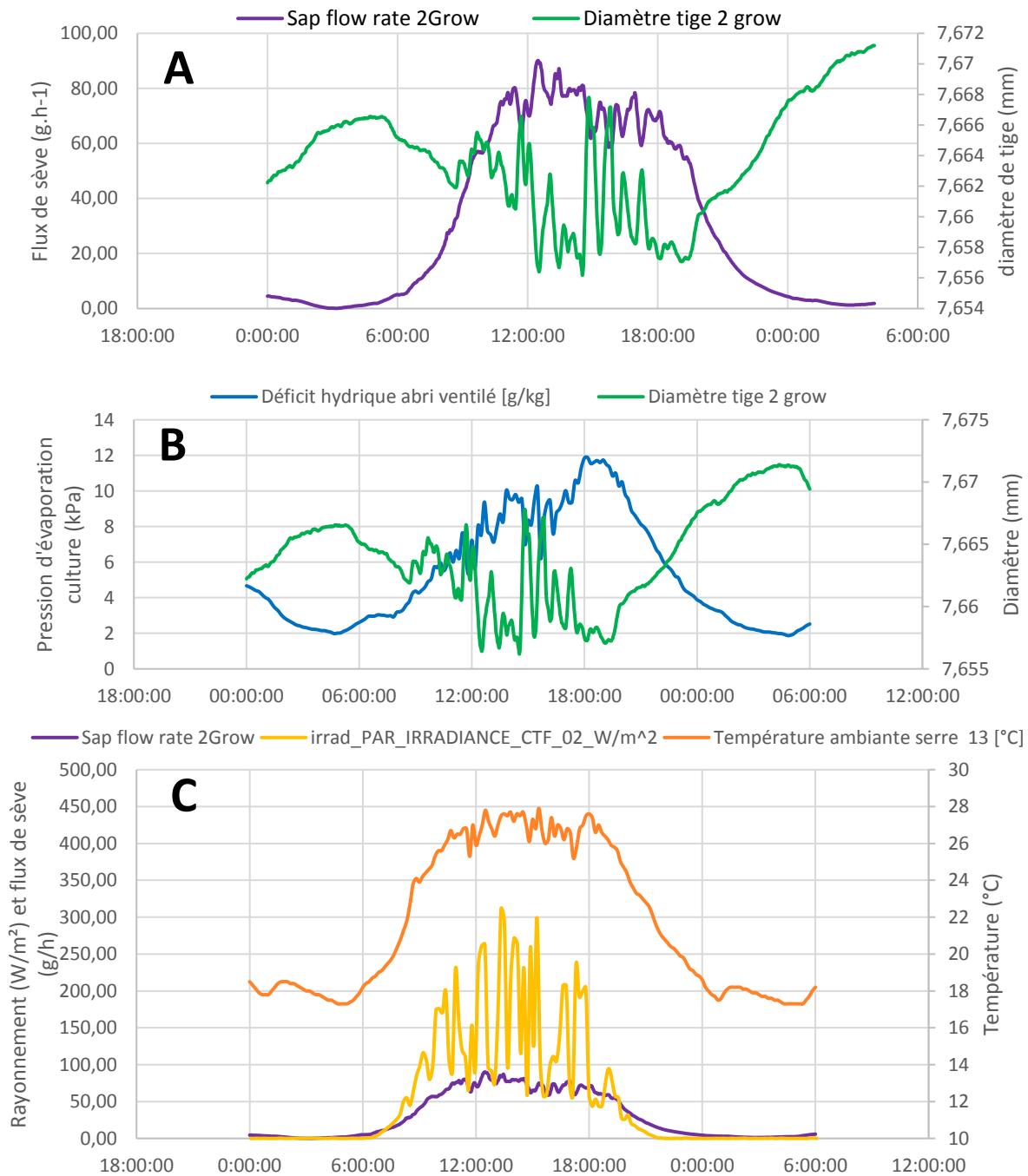


Figure 9 : Graphiques représentant, en A le flux de sève (en violet- axe principal des ordonnées) et le diamètre de tige (en vert- axe secondaire), en B le diamètre de tige (axe secondaire) et le déficit hydrique de la serre (en bleu - axe principale) et en C le flux de sève et le rayonnement PAR (jaune- axe principale) et la température ambiante (orange- axe secondaire) sur la période du 22 au 23 mai 2018.

IV- Résultats

1. Analyse des mesures des flux hydrique

Les paramètres du flux de sève et du diamètre de tige informent sur le potentiel hydrique de la plante : le premier indique le flux de transpiration de la plante, tandis que l'autre informe sur la pression subie par les vaisseaux. Quand les valeurs du diamètre de la tige augmentent et diminuent cela signifie qu'il y a un gonflement ou rétrécissement des tissus extensibles du xylème.

Ces deux paramètres sont représentés sur la figure 9, sur une période d'un peu plus de 24h. Les valeurs représentées dans cette figure (du 22 au 23 juin), sont représentatives d'une journée ensoleillée, et servent de modèle pour la description du comportement de ces paramètres. Le flux de sève varie de 0 à 90g.h^{-1} , ne dépassant pas la valeur maximale de 130 g.h^{-1} (valeur maximale observée durant la période d'enregistrement du capteur) tandis que le diamètre de tige est en constante augmentation. Dans cette mesure le diamètre total de la tige est pris en compte, mais à l'échelle d'une journée, la valeur ne varie ici que d'une dizaine de μm . Ces paramètres physiologiques sont très sensibles aux paramètres climatiques (figure 9 B et 9 C). L'état hydrique de la plante est impacté par plusieurs éléments, tels que la température ambiante, le rayonnement PAR et l'hygrométrie de la serre. Ces paramètres sont représentés ici à la même échelle de temps.

D'après la représentation graphique des flux de sève et du diamètre de tige (figure 9 A), le premier a un signal inverse au second. En effet lorsque le flux de sève est important alors le diamètre de la tige diminue. A l'inverse lorsque le diamètre augmente, le flux de sève est plus faible. La période diurne (de 6:46 à 21 :16 d'après le rayonnement cf. figure 9 C), débute par la réduction du diamètre de tige, généralement due à une hausse de la température, provoquée par la mise en route du chauffage ou le lever du soleil. Dans le cas de la figure 7, le chauffage est mis en route autour de 5h du matin causant cette baisse de diamètre de tige. Cela peut être mis en comparaison avec une augmentation du déficit hydrique de l'abri ventilé (figure 9 B), provoquée par la hausse de la température et du rayonnement (figure 9 C). Le déficit hydrique informe sur la quantité taux présent dans l'air : elle indique la quantité d'eau nécessaire à la saturation de l'air, en g eau/Kg air sec . Le flux de sève augmente, parallèlement à la température. En milieu de matinée, le diamètre de tige est marqué par trois hausses qui sont exceptionnellement corrélées au flux de sève. Ces événements, ont lieu en réaction à des déclenchements d'irrigations. Visible, chaque jour, en début de journée, ce phénomène est le seul qui a le même impact sur le flux de sève et le diamètre de tige. Par la suite les valeurs enregistrées (figure 9 A) montrent une succession d'augmentation et de diminution du flux de sève en alternance avec le diamètre de tige. En comparaison au figure 9 B et C, ces fluctuations peuvent être

Titre : matrice de corrélation de différents paramètres climatiques avec le flux de sève et le diamètre de tige.

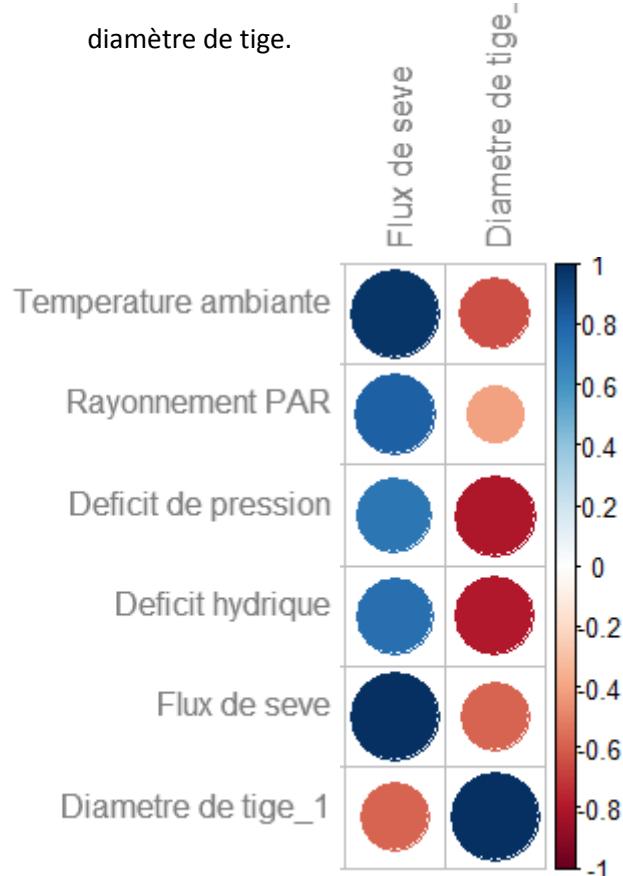


Figure 10 Représentation des corrélations reliant les différents paramètres climatiques de la serre avec les flux de sève et le diamètre de tige.

Titre : Matrice de corrélation représentant le gradient vertical

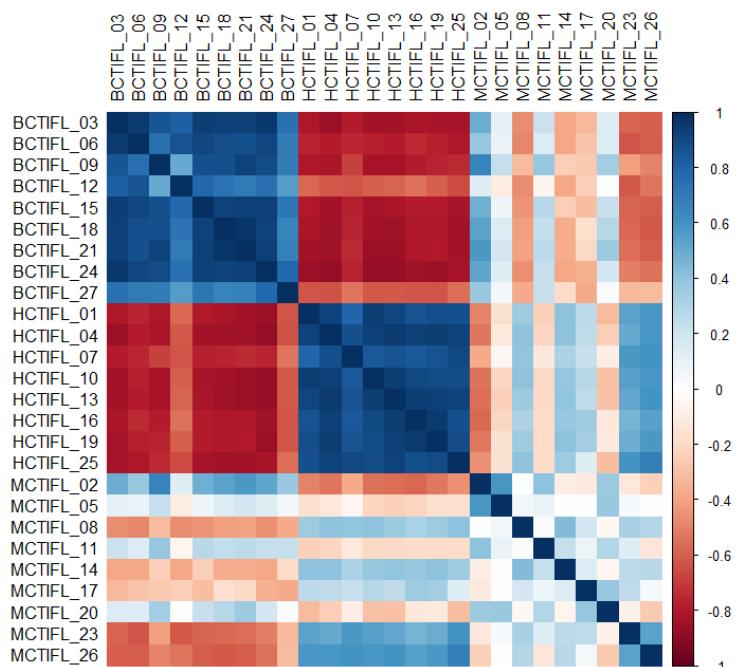


Figure 11 Graphique représentant les corrélations entre les mesures de températures sur une période de 24 jours du mois de mai à juin 2018. Les numéros des axes représentent les capteurs ayant effectués la mesure (3,6,9,12,15,18,21,24 et 27 au niveau haut, 1,4,7,10,13,16,19,15 au niveau bas et 2,5,8,11,14,17,20,23 et 26 au niveau intermédiaire)

en partie expliquées par le rayonnement et le déficit hydrique. Les flux de sève et le diamètre de tige réagiraient donc en fonction de l'ensoleillement, la hausse de température et d'hygrométrie dans le compartiment. Enfin la période nocturne, débute par une augmentation rapide du diamètre de tige et une baisse du flux de sève. Durant le reste de la nuit, le diamètre de tige augmente de manière constante, puis diminue en formant une courbe en cloche. En parallèle le flux de sève chute au minimum (figure 9 A). Cette chute de flux est corrélée à une baisse de la température et de rayonnement.

En effet, les deux paramètres physiologiques de la plante sont très sensibles aux paramètres climatiques de l'abri. La figure 10 est une matrice de corrélation révélant le lien entre ces paramètres et le climat de la serre. Le flux de sève est corrélé positivement surtout à la température (0.98) et au rayonnement PAR (0.84), ce qui signifie que ces éléments ont un impact positif sur le flux. Cela correspond aux observations précédentes, où dans la plupart des cas, lorsque le rayonnement PAR augmente, le flux de sève augmente également (figure 9 C). Le diamètre de tige est très négativement corrélé au déficit hydrique (-0.8) et au déficit de pression (DPV) (-0.79). Le déficit de pression (DPV) est la différence entre la pression vapeur saturante à la température de la plante (kPa) et la pression de vapeur de l'eau contenue dans l'air (kPa). Une hausse du déficit hydrique de la serre est donc liée à la baisse du diamètre de tige et à une hausse du DPV (figure 9 B).

2. Description de l'hétérogénéité climatique de la serre

La matrice de corrélation des températures permet l'observation de la répartition des températures aux différents étages de la serre. Ce graphique montre clairement de fortes corrélations des températures entre les capteurs du niveau « haut », en moyenne 0.90 (en bleu), ainsi qu'entre les capteurs du niveau « bas », environ 0.83 (en rouge) (figure 11). Le niveau intermédiaire est moins clairement différencié, avec une moyenne de corrélation de 0.13 il y a des températures faiblement corrélées positivement ou négativement selon leur localisation horizontale dans la serre. Cette corrélation illustre à la fois les différences existantes entre les zones du haut et du bas, mais aussi la forte cohésion entre les valeurs d'un même niveau, à l'exception du niveau intermédiaire. A ce niveau les températures enregistrées par les capteurs 23, 26, 14, 17 et 8 sont plus proches des températures enregistrées avec ceux du niveau plus haut avec une corrélation moyenne de 0.8. Tout d'abord, cette analyse étant faite d'après la différence à la médiane, les valeurs corrélées positivement sont donc supérieures à celle-ci et les valeurs corrélées négativement lui sont inférieures. De plus, ce cas regroupe une majorité des zones du milieu, ce qui indique que les températures sont plus hautes à ce niveau en moyenne et se rapprochent des températures ressenties au niveau supérieur. Ensuite, les capteurs 23 et 26 qui sont les plus corrélés, sont ceux les plus proches de l'extérieur (figure annexe 1), il est donc peu surprenant qu'ils aient relevé des températures plus élevées. Cette matrice de corrélation montre cependant la présence d'un gradient vertical dans la serre. Le gradient horizontal a également été étudié sur différentes périodes. Il

Titre : Comparaison des températures entre le niveau haut et bas de la serre sur l'année 2017

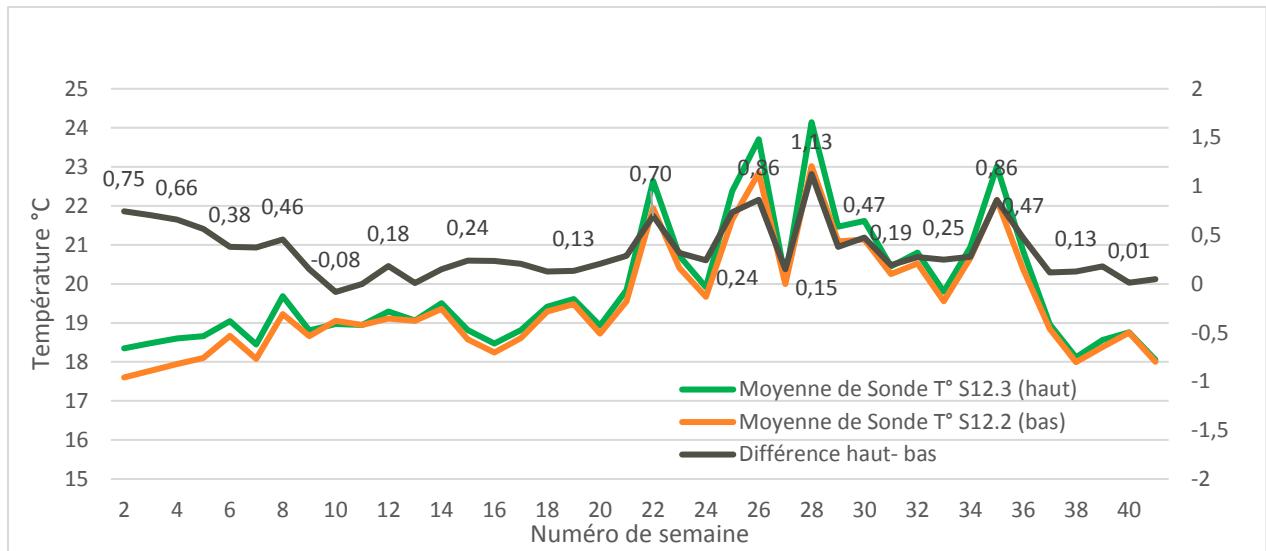


Figure 12 Graphique de comparaison des températures au niveau de l'apex (haut- courbe verte) et des fruits mature (bas- courbe orange) de la plante. La courbe des moyennes des différences est rattachée à l'axe vertical secondaire.

N° Bouquet	Moyenne degrés heure (Ch°)		Somme degrés heure (Ch°)		Durée en semaine de la croissance sur plante	
	Serre 12	Serre 13	Serre 12	Serre 13	Serre 12	Serre 13
1	330.99	320.68	24040	23257	9.38	9.36
2	333.79	322.86	26198	23206	10.21	9.27
3	336.30	326.25	26074	23728	10.08	9.39
4	338.38	330.08	22842	23165	8.64	9.03
5	338.05	331.18	27071	23451	10.44	9.11
6	339.99	333.50	25664	25025	9.78	9.72
7	341.16	336.82	25997	24968	9.88	9.59
8	343.55	340.31	25836	24449	9.74	9.27
9	345.03	344.71	24963	23652	9.34	8.80
10	351.45	350.24	25261	24328	9.27	8.92
11	356.73	356.64	25523	23931	9.22	8.59
12	360.10	362.35	25599	24387	9.16	8.61
13	365.99	365.38	25431	23400	8.92	8.14
14	375.98	377.63	26116	25155	8.92	8.51
15	382.85	385.44	26349	26653	8.83	8.87
16	389.56	392.41	25594	24742	8.39	8.01
17	398.03	400.51	26553	25294	8.53	8.02
18	404.28	409.16	26152	26071	8.25	8.11
19	405.69	412.97	25497	24972	7.98	7.64
20	402.69	410.73	26615	25066	8.44	7.72
21	402.30	409.36	26634	25267	8.46	7.82
22	401.76	407.30	27251	26725	8.69	8.37
23	399.77	404.93	27970	26601	9.00	8.38
24	394.22	400.12	28724	27717	9.42	8.90
25	385.04	397.16	27170	27168	9.08	8.78
26	374.06	383.86	28672	27616	9.96	9.30
27	369.59	377.02	26295	26744	9.16	9.14
28	365.05	372.26	25657	25467	9.04	8.78
29	363.45	369.01	25441	25621	9.00	8.92
30		370.37		23387		8.09

Tableau 1 Tableau de comparaison illustrant les degrés heure moyens, la somme de degrés heure et les temps de développement des fruits sur la plante en fonction de la serre relevé en 2017. La source de température est un point fixe dans la serre à hauteur intermédiaire. Le numéro de bouquet correspond à l'apparition du bouquet sur la plante, le 1 étant le premier bouquet apparu au début de la saison en janvier et le bouquet 30 le dernier étudié jusqu'à la récolte en septembre. L'échelle de couleur indique la grandeur du nombre correspondant à vert pour les plus petits à rouge pour les plus grands.

ressort une très faible variation entre les températures d'un même niveau, trop faible et irrégulière pour être prise en compte. La température semble donc répartie de manière homogène au sein d'un même niveau.

Dans un second temps, le gradient vertical de la serre a été étudié sur l'année précédente afin de visualiser son évolution sur une année complète et déterminer ces variations en fonction des conditions météorologiques. Pour cela les données de températures étant moins nombreuses (seulement 4 capteurs ventilés) seule une comparaison entre un point de mesure haut et un point de mesure bas est possible.

L'analyse des températures a également été effectué sur l'ensemble de l'année 2017, à l'échelle hebdomadaire, afin de rendre compte des variations globale. La figure 12 permet de voir que les températures du haut de la plante sont constamment plus chaudes que celle du bas. Il existe bien un écart entre ces deux valeurs, qui varie plus ou moins fort en fonction de la période de l'année (de 0 à 1.13°C) : en effet la différence de températures des premières semaines de culture jusqu'à la semaine 20 (mi-mai) n'est pas très importante (0.24 en semaine 15). Il y a une exception sur les premières semaines de l'année qui correspond à une période où les plantes sont encore jeunes et n'occupent pas tout l'espace de la serre. Durant la période printemps/été, de la semaine 22 à 29 l'écart devient important (de 0.15 à 1,13). La différence entre les deux points est directement liée à la température générale. En effet, durant les périodes de forte chaleur saisonnière, une tendance se dégage : plus la température est haute, plus l'écart entre le haut et le bas est grand. Par exemple l'écart de 1,13 est apparu le jour où les deux températures hautes et basses de la serre étaient à 24°C en haut et 23° en bas. Le gradient vertical est donc plus fort durant les périodes d'été. Ce comportement est également visible à l'échelle d'une journée, où durant la période entourant midi le gradient est plus fort que le matin.

3. Impact du gradient vertical sur le développement des fruits

En production hors-sol, les plantes sont soutenues par un fil tendu à environ 4 m ce qui permet à la plante de se développer sur une grande hauteur. L'initiation florale a donc lieu au plus près du toit et le fruit en développement descend une fois par semaine vers les niveaux plus bas. En moyenne il commence donc son développement à 3,71m pour finir entre 1,7 et 1,5 m près du circuit de chauffage. Lors de son développement un fruit traverse donc la serre dans sa hauteur et subit les différences de température liées au gradient vertical (figure 6). L'analyse des degrés heure reçus par les fruits rend possible l'observation du gradient de température naturel auquel sont soumis les fruits (tableau 1). En effet, à raison d'une moyenne de 9 semaines de croissance, le bouquet subit des conditions climatiques différentes et variables en fonction du climat saisonnier. Par exemple le bouquet qui a débuté son développement au cours du mois de mai (bouquet 18) sera récolté au mois de juillet (annexe III). Il

Tableau 2 Tableau des valeurs moyennes de degrés heure enregistrés pour chaque bouquet dans le compartiment 12 et 13 en 2017. Les températures sont enregistrées aux trois hauteurs différentes haut, milieu, bas. La moyenne est faite sur la durée que le bouquet a passé à chaque niveau. L'échelle de couleur indique la grandeur du nombre correspondant à vert pour les plus petits à rouge pour les plus grands.

Bouquet	Serre 12			Serre 13		
	Moyenne degrés heure haut	Moyenne degrés heure milieu	Moyenne degrés heure bas	Moyenne degrés heure haut	Moyenne degrés heure milieu	Moyenne degrés heure bas
1	307.51	313.66	318.09	306.94	319.55	315.36
2	309.60	315.15	320.27	309.88	320.97	317.56
3	313.42	317.01	320.31	315.91	318.60	324.05
4	317.69	319.12	322.38	322.58	320.88	327.34
5	319.12	319.84	313.57	327.53	320.53	323.83
6	320.97	322.32	311.68	326.47	325.74	320.00
7	318.71	320.48	316.62	323.22	329.70	323.74
8	321.28	316.43	322.84	324.85	326.95	332.77
9	322.81	314.98	325.19	332.10	326.35	337.79
10	323.60	316.65	339.25	335.66	328.64	344.05
11	319.68	321.57	351.06	332.98	334.72	357.43
12	314.43	326.32	358.63	328.95	341.95	367.59
13	316.05	339.97	359.13	329.37	352.12	365.24
14	323.62	350.56	368.50	338.66	361.68	375.65
15	326.92	356.55	379.94	343.15	365.34	387.38
16	333.11	367.23	383.90	347.41	375.58	398.07
17	352.66	376.01	383.14	361.29	386.54	391.71
18	367.24	383.94	380.55	377.11	393.71	394.49
19	371.61	392.04	366.51	381.48	403.40	390.22
20	377.65	388.36	354.84	387.03	401.41	379.48
21	391.70	381.60	349.22	398.95	395.38	371.85
22	397.26	375.10	352.82	406.25	391.15	369.39
23	399.51	363.97	359.46	414.17	380.60	371.48
24	395.18	358.06	352.95	404.15	373.03	376.84
25	380.16	360.32	331.76	404.08	369.37	372.44
26	366.53	362.87	312.55	384.28	375.67	346.73
27	356.55	357.84	306.41	371.50	376.00	336.60
28	355.72	348.25	303.98	366.83	369.45	332.69
29	355.53	344.13	304.31	363.63	367.19	330.34
30				370.17	361.63	329.90

Titre : Moyenne des Sommes des degrés heure reçus par les bouquets

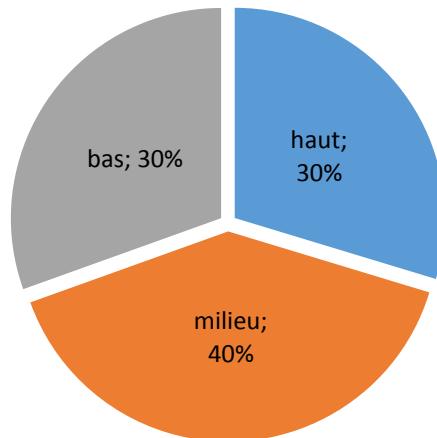


Figure 13 Graphique des proportions des sommes de degrés heures reçus par les bouquets aux différents niveaux

connaitra ainsi un réchauffement global de la température et une augmentation du rayonnement reçu. Ce qui a pour effet d'augmenter la somme et la moyenne de degrés heure. Sa somme de degrés heure est donc de 26 111 Ch° avec une moyenne de 406 Ch° par rapport à un bouquet de mars qui lui aurait reçu 25 142 Ch° avec une moyenne de 341 Ch°. A l'inverse les bouquets débutés en juillet recevront en moyenne des températures plus chaudes que ceux débutant en aout, (près de 400 Ch° en moyenne en juillet contre 366 Ch° en aout), diminuant la somme de degrés heure. Cependant la somme de degrés heure est à mettre en lien avec la durée de croissance du bouquet sur la plante car l'impact du temps est fort. Cela est observable en comparant le bouquet 5 dans la serre 12 qui est resté en moyenne 10,4 semaines sur les plantes et bouquet 4 de la même serre qui n'est resté que 8,6 semaines. Le premier a une somme de degrés heure reçus de 27 071 °Ch tandis que l'autre en a reçu 4 200 de moins (tableau 1).

Le tableau 2 donne une image des températures réelles subies par les grappes lors de leurs développements. La prise en compte de l'hétérogénéité du climat permet d'avoir la moyenne des températures subies par hauteur. Cet effet est soustrait au gradient naturel : le gradient naturel a pour effet une augmentation des degrés heure subis par la grappe au fur et à mesure de son développement. L'hétérogénéité climatique a pour effet de baisser les degrés jours subis selon la hauteur d'une grappe à un temps donné. Par exemple le bouquet numéro 10, a subi 323 Ch° lors de sa phase de croissance au niveau haut. A ce moment le bouquet 5 était sur la plante au niveau bas, avec une moyenne de degrés jour de 313 Ch°.

Le bouquet 10 a donc subi une plus forte température en moyenne lorsqu'il était au niveau bas de la plante, principalement dû à l'évolution climatique qui a eu lieu durant sa descente. En fonction des périodes de l'année les bouquets ne subissent pas les mêmes températures.

La somme de degrés heure reçue par le fruit est en moyenne de 24 714°C sur une durée de 68.9 jour. Le bouquet reçoit la plus grande partie de la somme de degrés heure lorsqu'il est au niveau intermédiaire (figure 13). Cette phase est généralement plus longue que les deux autres avec 28 jours de moyenne contre 21 pour les deux autres. La phase au niveau bas a une valeur beaucoup plus variable car ici elle n'est plus régulée par la descente de la plante mais par la récolte, qui est faite en fonction de la coloration du fruit.

L'observation de l'effet de l'hétérogénéité climatique sur le fruit se fait par la modélisation de la croissance de fruit, grâce au modèle décrit par (Fanwoua *et al.*, 2013). Plusieurs scénarios ont été mis en place afin de mettre en avant l'impact des changements de températures sur la croissance du fruit. Les résultats présentés par les figures 14,15 et 16 sont issus des simulations effectuées. Le modèle utilisé décrit la croissance du péricarpe d'un fruit : sa masse, le nombre de cellules présentes, son âge... Dans ce cas, plusieurs scénarios de températures ont été testés pour connaître l'impact d'un changement de température sur la croissance du fruit. La figure 14 représente une augmentation

Titre : Modélisation des masses des péricarpes de fruit sous différentes températures.

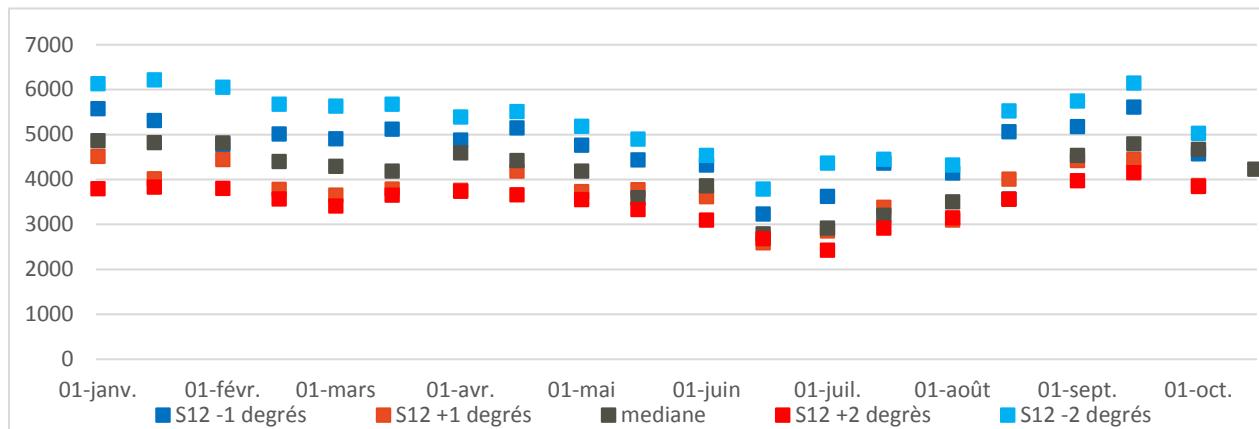


Figure 14 Graphique représentant les masses des péricarpes simulés d'après le modèle de Fanwoua et al., 2013 sous différentes températures : la médiane des températures enregistrées dans les serres 12 et 13 en 2017 (gris), la médiane des températures plus un (orange) ou deux (rouge) degré et la médiane moins un (bleu foncé) et deux (bleu claire) degrés.

Titre : Impacts des changements de température sur les masses des péricarpes.



Figure 15 Représentation de la répartition des masses des péricarpes à différentes températures de croissance. L'axe de Y représente la masse du péricarpe en mg et l'axe de x les différentes modalités. Il y a quatre modalités avec un changement dans les températures aux différents niveaux de la serre. L'environnement témoin (S122017), baisse de la température au niveau bas (S12botcold), baisse au niveau intermédiaire (S12midcold), baisse au niveau intermédiaire jusqu'au niveau haut (S12midtopcold) et au niveau haut (S12topcold).

Tableau 3 Résumé des moyennes et écart types des masses prédictives des péricarpes avec des changements de température lors du développement.

	MOYENNE (MG)	ECART TYPE (MG)	MEDIANE (MG)
S122017	4189.56	524.34	4390.65
S12botcold	4200.42	627.07	4399.91
S12topcold	4276.63	682.06	4462.35
S12midcold	4436.14	684.40	4723.57
S12midtopcold	4561.93	644.65	4742.19

globale de la température de plus ou moins un ou deux degrés sur l'ensemble de l'année. Dans un premier temps l'observation de la médiane des masses obtenues permet de voir un effet climatique sur les masses. En effet, les masses des péricarpes diminuent de janvier à juin passant de 4820 mg à 2790 mg, puis remontent de juillet à octobre jusqu'à 4670 mg, en corrélation avec les changements de températures observables selon les saisons de l'année. Ensuite, on remarque que les températures les plus basses augmentent significativement la masse du péricarpe du fruit, tandis que les températures les plus chaudes ont l'effet inverse. Cela est confirmé par l'écart moyen par rapport à la médiane. Les masses de la modalité avec une température la plus basse (médiane -2) ont un écart moyen de + 1077 mg par rapport à la médiane tandis que les masses de la modalité la plus chaude (médiane +2) ont un écart moyen de - 720 mg. Il faut cependant noter que le fruit est mûr plus tard que le témoin dans le cas des températures basses (annexe 1). Le fruit reçoit des températures plus faibles donc moins de degrés heure par jour alors doit rester plus longtemps sur la plante afin de se développer complètement. A l'inverse les fruits qui reçoivent des températures plus chaudes sont matures plus tôt.

Dans un second temps l'impact de l'hétérogénéité climatique par niveau à fait l'objet d'un test. Quatre scénarios avec des changements de température aux différents niveaux du compartiment ont été modélisés afin de voir l'impact du gradient vertical sur la croissance des fruits. L'impact des changements de température sur la masse des péricarpes n'est pas significatif. Cependant les figures 15 et le tableau 1 permettent de voir des différences notables. Cette représentation graphique en violon illustre la dispersion des valeurs de masses au sein des différentes modalités. En effet, la largeur du schéma représente le nombre de données présentes en un point. Par exemple, dans le cas du témoin une grande partie des fruits a un péricarpe avec une masse située entre 4 250 et 4500 mg. La dispersion de ces masses très homogène permet de conclure que les fruits ont un péricarpe avec une masse assez constante, contrairement aux autres cas où les masses sont très dispersées. Une différence est également visible entre les données témoin et celles aux températures plus faibles au niveau intermédiaire (S12midcold et S12midtopcold). En effet dans le cas de ces deux modalités la figure montre que le nombre de valeurs autour de 4 750 et 5 000 est plus important qu'ailleurs. Les masses semblent donc majoritairement plus hautes que le témoin, ce qui est appuyé par la médiane et la moyenne (tableau 3). D'après les moyennes, une légère différence apparaît également entre le témoin et la modalité de température plus froide en haut. La masse des tissus du péricarpe serait donc impactée légèrement par un changement de température au niveau haut, et plus fortement par une baisse de température au niveau intermédiaire.

Les résultats précédents ont soutenu l'hypothèse selon laquelle, lorsque le fruit reçoit une température plus faible, il passe un temps plus important sur la plante. Dans ce cas, cette hypothèse n'est vérifiée qu'avec la modalité de températures faible au niveau bas. Les fruits ayant reçu des

Titre : Impact de la température et du rayonnement extérieur sur la température interne du compartiment avec différentes modalités de ventilation.

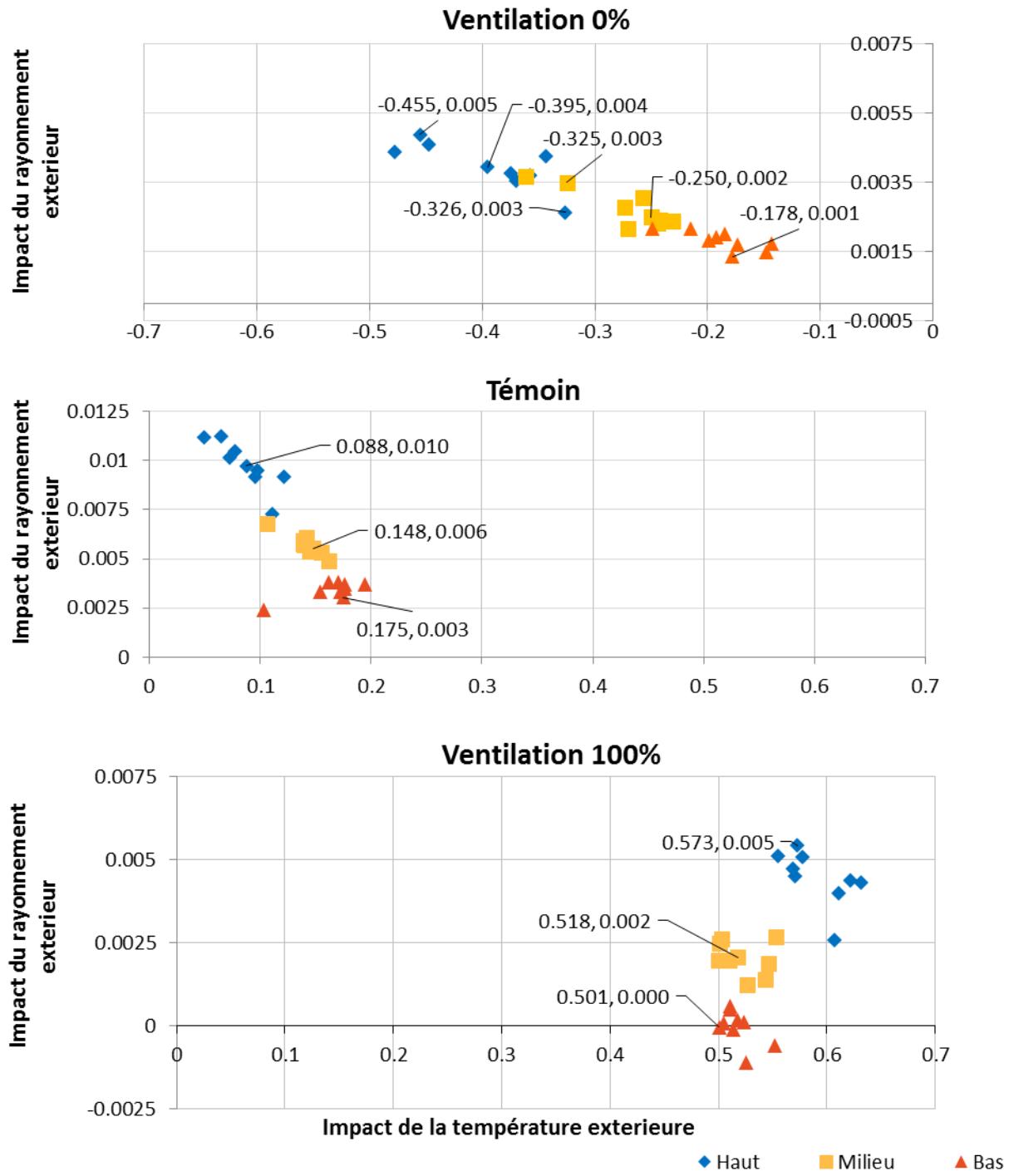


Figure 16 Graphique illustrant les coefficients de régression entre les températures relevées dans les compartiments avec les températures et rayonnements extérieurs. Chaque point représente un capteur parmi les 27 utilisés dans la serre. Chaque couleur représente une hauteur : en bleu les capteurs haut, en orange ceux au niveau intermédiaire et en rouge ceux au niveau bas Trois modalités sont analysées, le témoin dont la ventilation est à 50% de capacité, celle où la ventilation est à 100% et celle où la ventilation est à 0%.

températures plus faibles aux niveaux intermédiaire et haut ont passé au moins une journée de moins sur la plante (annexe 1) : des températures plus froide au niveau haut ou milieu seul ont diminué le temps passé d'une vingtaine d'heure soit une journée de moins et la modalité haut et milieu a diminué le temps passé de 75h soit 3 jours.

4. Maitrise de l'hétérogénéité de la serre

Le climat de la serre est contrôlé par de multiples actionneurs, il semble donc possible de contrôler l'hétérogénéité climatique. La problématique qui se pose est de connaître les actionneurs nécessaires afin de maîtriser cette hétérogénéité selon les besoins de la culture. Une première hypothèse est l'action de la ventilation. Pour cela une expérimentation a été mise en place afin de voir l'impact de cet actionneur sur la répartition de la température dans la serre. Deux modalités ont été comparées à l'utilisation normale de la ventilation décrite plus tôt : aucune ventilation et 100% de ventilation (utilisation des ventilateurs à leur capacité de brassage maximum) et une ventilation à 50% de la capacité des ventilateurs.

La figure 16 représente les températures enregistrées aux différents niveaux en fonction de l'impact de la température et du rayonnement extérieur. Les températures enregistrées dans le cas de la ventilation à 0% sont négativement corrélées à la température extérieure, ce qui signifie que les températures extérieures ont eu pour impact de baisser ces températures. De même, la représentation de l'essai témoin montre des valeurs beaucoup plus sensibles aux rayonnements que les deux autres modalités. En effet, lors des expérimentations à 0 et 100% de ventilation, le rayonnement global était moins élevé que les semaines précédentes et suivantes, ce qui explique ces résultats. Cela illustre le problème de l'influence extérieure sur cette analyse ce qui empêche la comparaison directe des températures enregistrées. Cependant cette représentation permet de voir les différences entre les différents points d'enregistrement des températures. Dans le cas de la ventilation à 0%, les points de mesure du niveau haut se détachent en deux groupes plus ou moins influencés par la température extérieure allant d'un coefficient d'environ -0,46 pour le premier groupe et -0,40 pour le second. Cette observation est valable pour chaque niveau : la température extérieure impacte différemment les points de mesures au sein d'un même niveau, provoquant des différences entre les points. Cela montre une légère hétérogénéité horizontale à ce niveau. De même pour le niveau intermédiaire, avec deux zones plus influencées par le rayonnement et la température (-0,33 et 0,003). Cette modalité a des températures plus hétérogènes par niveau et ces niveaux sont faiblement dissociés les uns aux autres. A l'inverse, la modalité de ventilation 100% affiche des niveaux très différenciés les uns des autres et des valeurs très regroupées par niveau. La modalité témoin affiche un schéma semblable aux deux modalités : il y a une différenciation forte entre le niveau bas et milieu, avec des coefficients de rayonnement différents (0,003 et 0,006). La différenciation est plus

faible entre le niveau intermédiaire et le haut. Le gradient vertical est donc présent partout, mais de manière plus ou moins marqué. Tandis qu'un gradient horizontal fait son apparition dans les enregistrements des températures en ventilation à 0%.

V- Discussion

1. Analyse des mesures des flux hydrique

Le modèle utilisé par le programme Magestan, issu de l'étude de Lui *et al.*, 2007, présuppose que la croissance du fruit est le résultat d'une accumulation d'eau et de matière sèche. Le flux d'eau entrant dans le fruit est donc directement lié au potentiel hydrique de la plante. Celui-ci peut être caractérisé par les mesures de flux de sève et de diamètre de tige. En effet, la mesure du flux de sève donne une indication sur la transpiration de la plante, celle-ci étant directement influencée par le déficit hydrique et l'ouverture stomatique (Jones, 2004). Cette mesure est donc très sensible aux paramètres environnementaux ce qui rend son interprétation difficile. La mesure du diamètre de tige permet de connaître les variations de taille de la tige qui sont corrélées à l'état hydrique de la plante. La cause de ces variations n'est pas exactement définie : le principal postulat décrit ce mouvement comme une propagation de l'eau autour des tissus du phloème et les dérivées cambiaux (Molz *et al.*, 1972). Cependant, une étude de Génard *et al.*, en 2001, a contredit cette hypothèse avec une modélisation simulant les variations des diamètres des racines et de la tige d'une plante dans différentes conditions hydriques. D'après l'ensemble de ces recherches, le mouvement de la tige mesuré par le LVDT serait dépendant d'un ensemble de paramètres tel que la nature de la tige (herbacée ou non), l'élasticité des tissus parenchimateux de la tige : les tissus du phloème, les tissus cambiaux et les tissus vivants du xylème (Fernández *et al.*, 2010) et les propriétés de stockage de la tige.

En observant les valeurs enregistrées par les capteurs de flux de sève et de diamètre de tige, une corrélation négative assez forte apparaît entre eux. Ces deux paramètres donnent une indication sur l'état hydrique de la plante : dans une période diurne les températures augmentent, entraînant une augmentation de la transpiration de la plante. Il y a donc une augmentation du flux de sève et de la demande en eau. Les ressources d'eau stockées sont alors utilisées en corrélation avec une diminution du diamètre de la tige. Cependant le flux de sève et le diamètre de la tige sont basés sur la mesure de phénomènes différents : les informations qu'ils fournissent sont donc complémentaires (Swaef *et al.*, 2010). Par exemple, dans le cas d'une irrigation, le taux d'humidité de la rhizosphère augmente ayant pour effet l'augmentation du diamètre de tige et du flux de sève (Fernández *et al.*, 2010). Le diamètre de tige est affecté par l'âge de la plante (croissance des tissus) et la charge en fruit

de la plante (force des puits). L'âge de la plante et plus exactement l'âge des tissus, impacte l'élasticité cellulaire et la structure des tissus (Swaef *et al.*, 2010). Cela a pour impact une forte croissance du diamètre de la tige lors de la phase jeune plante, dû à la croissance rapide des cellules, qui est ensuite réduite avec la maturation de la plante. Cette réduction est principalement causée par l'âge des tissus mais également par la force de puits très faible de la tige. La croissance de la tige est donc limitée durant la croissance des fruits. Cette compétition est présente durant la plus grande partie de la production car il y a constamment des fruits en croissance sur la plante. Elle est toutefois maintenue au même niveau grâce à la gestion de la charge en fruit (Swaef *et al.*, 2010) . Les variations du diamètre de tige enregistrées donnant des indications sur la charge en fruits des plantes, cela pourrait être utilisé pour la gestion de l'équilibre de la plante (nombres de puits et stress).

Le flux de sève est plus affecté par son environnement, comme décrit plus tôt, car il reflète le taux de transpiration de la plante. Cette transpiration est principalement influencée par une hausse des températures et du rayonnement (Rayonnement PAR) ce qui est corrélé par une baisse de l'humidité relative et une augmentation du déficit hydrique (Liu *et al.*, 2007). Ce paramètre est donc un point clé permettant la gestion climatique de la serre. Lié à la pratique culturelle, son suivi permettra de maîtriser le climat de la serre avec un regard sur l'activité de la plante. En effet, une forte transpiration signifie également une forte activité circulatoire et donc un apport de nutriment aux puits. La succession de phase de forte hausse et de diminution de l'activité transpiratoire montre que la plante est en grande activité. En parallèle, le diamètre de tige qui est plus descriptif de l'état hydrique de la plante, subit une forte augmentation après les phases de transpiration, ce qui signifie une bonne reprise de la plante : les stocks sont rechargés après l'activité de la plante, ensuite elle est en bonne condition pour reprendre l'activité (Varrewaere, 2018). Le même schéma est visible au cours de la période nocturne. Cette période est une phase de repos pour la plante, il n'y a donc pas d'activité du flux de sève et une forte activité de croissance de la tige.

La combinaison de ces paramètres permet également une gestion du stress de la plante. En effet, la somme journalière du mouvement du diamètre de la tige (somme des baisses et augmentation du diamètre), donne une indication sur l'état de stress de la plante. Lorsque cette valeur est négative, cela signifie que le temps d'activité de la plante est plus important que son temps de repos. A l'inverse lorsqu'elle est positive, la plante a subi une activité moindre. Dans un schéma parfait, ces phases se succèdent afin de maintenir un équilibre dans l'activité de la plante. Dans le cas où cette valeur est négative plusieurs jours sans reprise, cela indique que la plante est en stress, la croissance végétative de la plante est diminuée (Varrewaere, 2018).

En conclusion, les mesures du flux de sève et du diamètre de tige sont complémentaires : l'un donne des indications sur le climat et l'activité de la plante tandis que l'autre renseigne sur l'état hydrique de la plante et si elle subit un stress. Le modèle « plante » utilisé par le programme

Magestan se basant sur les flux hydriques de la plante pour expliquer le développement des fruits, ces deux indicateurs sont idéaux pour faire le lien entre le modèle et la plante.

2. Hétérogénéité climatique de la serre

L'étude de la répartition des températures au sein de la serre a prouvé la présence d'une hétérogénéité climatique : le compartiment est soumis à cette hétérogénéité tout au long de la culture. Cela est expliqué dans la bibliographie par la densité de culture et la canopée importante des plants (Boulard *et al.*, 2017). La répartition des rangs de plante, à plus ou moins forte densité, structure la serre en plusieurs fractions verticales, et la taille importante de la canopée, répartit le rayonnement entrant de manière inégale entre les différents niveaux. D'après les résultats obtenus, la gestion climatique actuelle (ventilation à 1.8 vol/h) est suffisante pour minimiser le fractionnement vertical. Il n'y a donc pas de gradient horizontal dans les serres étudiées. Il y a cependant un gradient vertical, plus ou moins important. Ce gradient est plus important durant les périodes de fortes températures. En effet, durant les périodes de fort ensoleillement, la différence semble plus importante dû à l'écart entre les températures extérieures et celles souhaitées par la gestion climatique. La stratégie de refroidissement de la serre est basée sur la ventilation, l'ouverture de l'abri et la mise en place d'un écran d'ombrage. La ventilation ajoutée à l'ombrage créé par l'écran et la canopée permet de réduire considérablement la température au niveau bas de la serre, mais au niveau le plus haut l'écran et l'ouverture ne suffise pas. La maîtrise de l'hétérogénéité climatique est donc un défi lors de l'augmentation des températures et de l'ensoleillement extérieur. L'analyse de l'hétérogénéité climatique a également été faite par Cybeltech dans les serres d'expérimentations chez l'Earl Transon. Cela a mis en avant une répartition des températures très différente de celle trouvée dans les serres du CTIFL. En effet, les serres Transon présentent une hétérogénéité bien plus marquée et la présence de deux gradients : l'un vertical et l'autre horizontal. Ces deux serres se différencient par leur stratégie de ventilation. L'EARL Transon a choisi de ne pas utiliser de ventilation dans son compartiment. La ventilation étant l'actionneur le plus important dans l'homogénéisation du climat de la serre (Qian, *et al.*, 2015), l'hypothèse émise est que les différences climatiques observées ont été causées par le manque de ventilation. Le résultat obtenu dans le compartiment du CTIFL avec les différents scénarios de ventilation corrobore cette hypothèse. En effet, un gradient horizontal est obtenu avec la mise en place du scénario de ventilation à 0%. Cependant ces différences sont faiblement marquées et la mise en place de cette expérimentation est critiquable dû à l'influence du climat extérieur entre chaque modalité. Une seconde expérimentation sur une même durée dans des compartiments différents permettrait de valider ou non cette hypothèse. Dans la pratique il existe plusieurs types de ventilation qui pourraient permettre une meilleure maîtrise de l'hétérogénéité du climat. En effet, les résultats n'ont pas confirmé ou infirmé qu'une plus forte ventilation amoindrie l'hétérogénéité climatique. Il est

donc possible d'imaginer une configuration de serre avec plus de ventilation. D'autres aménagements sont également possibles tels qu'une ventilation placée en haut de la serre, afin de créer un mouvement descendant de l'air (Kas als Energiebron, 2018). Enfin, il existe des serres dont la ventilation par les fenêtres est minimisée avec un système semi-fermé ce qui permet de maintenir un taux d'enrichissement de l'air (CO_2 , humidité) intéressant pour la culture. Ce type de serre a été utilisé dans une étude de Qian et al., en 2015 dans laquelle les chercheurs ont pu supprimer la présence d'un gradient vertical . Dans le cas d'une serre semi fermée l'air est refroidi et déshumidifié afin d'être réinjecté dans la serre. Habituellement, ce relargage est au niveau bas de la serre sous les pieds des plantes, comme dans une serre classique. Dans l'étude présente, l'air était pulsé en haut de culture ce qui entraîne un mélange d'air frais avec l'air chaud et une réduction du gradient donc une réduction de l'hétérogénéité climatique. Le rayonnement extérieur étant l'un des principaux paramètres entraînant une hétérogénéité climatique, il est aussi possible de mettre en place d'autres actions minimisant le rayonnement entrant durant les mois d'été avec les écrans d'ombrage.

L'influence de la température est l'une des choses qui affecte le plus la croissance de la plantes (Qian, et al ., 2015). La présence de l'hétérogénéité climatique a donc un impact sur la croissance du fruit. D'après les sommes de degrés heure calculés, le gradient vertical accentue la différence de degrés heure reçue par les bouquets successifs au cours de la culture. L'impact météorologique n'est pas maîtrisé ce qui conduit à des modalités climatiques très différentes d'un mois à l'autre. Deux bouquets qui se développent l'un après l'autre sur la plante ne reçoivent pas les mêmes températures à un même âge. Les différences de températures reçues par deux bouquets successifs pourraient être atténuées dans une serre de type semi-fermé où l'air est plus facilement refroidi.

De plus les gradients verticaux font qu'un même bouquet ne reçoit pas des températures similaires selon la hauteur à laquelle il est. Par exemple durant la phase de croissance (début du développement) il ne reçoit pas les mêmes températures que durant la maturation (fin de développement). En moyenne les principaux processus sont corrélés avec la hauteur du fruit dans la serre : Le fruit est dans le niveau haut durant la majorité de la croissance cellulaire, puis au niveau intermédiaire durant l'endoreplication et la maturation se fait au niveau bas. Ces différents processus de développement du fruit sont déterminés par le nombre de degrés heure reçus (division cellulaire 892.3 Ch°, endoreplication 13 728 Ch° et fin de croissance 20 592 Ch pour la variété Moneyberg selon Fanwoua et al., 2013). La durée de ce processus dépend de la moyenne de degrés heures reçue, si les températures sont hautes, la somme de degrés heure nécessaire à un processus sera plus vite atteinte. Dans ce cas le développement pourra ne pas être complet. Tout d'abord la température a un impact sur le taux d'initiation de bouquet par plante (Qian et al., 2015). Normalement le taux d'initiation de bouquet est de 1 par semaine (Serre 12 et 13, 1,1 bouquets par semaine avec 21.3° par jour base 12°C). Une température plus haute augmente donc le taux

d'apparition des bouquets cependant une température trop haute (28°C) peut également causer un nombre de fruits moins important par grappe ou des partenocarpies dans les fruits produits. La température du niveau haut doit donc être contrôlée à la fois pour l'initiation des bouquets et pour l'initiation de la phase de croissance cellulaire. Dans le premier cas une température de 23 à 28° C est suffisante pour accentuer le nombre de bouquets sans causer de perte. Cette température est respectée la plupart du temps, mais pas en période de plus fort ensoleillement. Une température haute en continue durant la phase de croissance entraîne une division cellulaire trop rapide ce qui amène à un fruit plus petit. Cela a aussi pour effet une réduction de la masse fraîche, dû à un chargement en eau moins important (Gautier et al., 2005, Fleisher et al., 2006). Cela concorde avec les résultats obtenus avec la modélisation de la croissance du fruit, dans le cas de température plus faible au niveau haut la masse du péricarpe est plus forte que dans le cas de températures plus haute. D'autres observations ont mis en avant que des températures plus fraîches au niveau intermédiaire avaient le même effet, ce qui confirme que l'étape clé de croissance de fruit (division cellulaire et endoréplication) a lieu à ce niveau. Le poids moyen est réduit dans une tranche de 10 à 30°C par tranche de 5 µm/h/°C. Plus la température reçue est forte plus le poids moyen est réduit (Adams et al., 2001, Fleisher et al., 2006). Enfin, en ce qui concerne la phase de maturation, une température plus basse en continu, augmente sa durée. Cependant le taux de matière sèche dans un fruit est peu impacté par la température reçue lors de la maturation (Adams et al., 2001). En effet, la température influence les transports et le stockage durant la maturation du fruit mais les composés structuraux tels que les métabolites secondaires sont déjà présents dans le fruit au moment de la maturation. Cependant la température a un impact sur la qualité du fruit : En effet des études ont montré que la température reçue peut-être corrélé à la fermeté du fruit. La température reçue durant la croissance cellulaire a un impact sur la structure cellulaire du fruit ce qui affecterait la texture et la fermeté (Fanwoua et al., 2012). Ces résultats sont toutefois difficiles à répéter car la taille du fruit diminue également sous forte température, ce qui entraîne également la fermeté du fruit (Gautier et al., 2005). D'un point de vue organoleptique la forte température favorise la qualité du fruit. Celle-ci augmente les quantités de sucres (Brix°) et d'acidité titrable (acide citrique) présent dans le fruit (Fleisher et al., 2006). En ce qui concerne la teneur en Lycopène, la voie de biosynthèse est sensible à de forte température. Cela peut donc engendrer une diminution de la teneur en lycopène. Fleisher et al., 2006 met en avant que la diminution de ce métabolite est parfois corrélé avec une augmentation de la couleur rouge, ce qui signifie que la couleur externe du fruit seule n'est pas suffisante pour juger de la qualité des fruits.

Les gradients présents dans la serre semblent donc avoir un impact sur la qualité des fruits. En effet, en plus des impacts directs des températures sur le développement du fruit, la fluctuation durant la croissance peut avoir un impact sur le rendement (Adams et al., 2001). Cependant une même étude de Qian et al., en 2015 sur l'impact de l'hétérogénéité climatique ne démontre pas cet

impact. La différence de température entre deux niveaux n'est peut-être pas assez importante, dans cette configuration, pour vraiment causer une différence. D'après nos résultats, d'un point de vu des degrés heure moyen reçu par le fruit, l'écart est de 10 degrés heure, ce qui semble faible. Mais en reprenant cet écart à l'échelle des sommes de degrés heure reçu par le fruit sur une période de 9 semaines (figure annexe 1), cet écart est beaucoup plus important. La modélisation de la masse des péricarpes confirme cette effet, avec un écart d'un gramme pour une différence moyenne de seulement deux degrés, cette modélisation ne prenant en compte que la masse de la matière sèche du péricarpe du fruit. L'impact de la température est donc plus important dans ce cas. L'impact de l'hétérogénéité climatique est donc à relativiser en fonction des écarts de températures.

La maîtrise de cette hétérogénéité par le programme Magestan permettra une meilleure maîtrise de la qualité de fruit. Les températures reçues durant le développement du fruit pourront être optimisées afin d'obtenir un fruit de qualité avec une taille correcte : avec une température élevée au niveau haut, pour favoriser l'initiation de bouquet, mais maîtrisée afin de ne pas impacter négativement la plante. Soit une température moyenne comprise entre 23 et 28° C. Une température faible en milieu de serre, afin d'optimiser la phase de croissance cellulaire et le chargement en eau du fruit, soit 18 à 23°C. Puis une température haute pour la phase de maturation afin de favoriser la biosynthèse des métabolites secondaires, par exemple entre 23 et 28°C, en prenant garde de ne pas avoir d'effet délétère tel qu'une diminution trop importante de la charge en lycopène (<32°C). Toutefois ces températures, issu d'étude sur des petits plants, sont à confirmer par des expérimentations. Pour cela de nouvelles recherches seront nécessaires pour trouver les actionneurs qui influencent la répartition des températures et développer un modèle climatique capable de piloter la répartition des températures de manière localisé, à chaque niveau de la serre, donc à chaque étape de développement du fruit. L'optimisation des températures est aussi un levier pour favoriser un bon rendement. La maîtrise des sommes et moyenne de températures perçues par les fruits donne accès à la gestion du temps de production des grappes.

VI- Conclusion

Cette étude a été riche en résultats qui constitueront des voies d'amélioration du programme Magestan. En effet, l'analyse des paramètres du flux de sève et de diamètre de tige a mis en avant leurs intérêts. La superposition de ces deux mesures renseigne sur l'état de la plante (activité et stress) ainsi que sur l'impact du climat sur le processus physiologique de transpiration. Ces informations pourront parfaitement être intégrées au modèle utilisé par le programme Magestan qui fera ainsi l'interface entre le programme et la plante, permettant une re-calibration régulière.

L'étude de l'hétérogénéité climatique de la serre a également fourni des réponses sur la répartition des températures. Celle-ci est dirigée par un gradient vertical qui peut être modifié. Les essais de ventilation ont prouvé qu'un changement simple des modalités de ventilation pouvait avoir un impact plus ou moins important sur la répartition des températures. Toutefois une expérimentation plus précise est nécessaire, elle sera d'ailleurs mise en place durant la saison prochaine. Des solutions pour augmenter le contrôle sur l'hétérogénéité climatique ont été discutées telles que la serre semi-fermée ou l'augmentation du volume des ventilateurs. Ces solutions nécessiteront une analyse d'efficacité. Si la maîtrise du climat est un enjeu important, elle doit être accessible au domaine de la production.

Enfin, un impact du changement de température au cours de la croissance des fruits a été mis en avant sur la masse du péricarpe du fruit. Par la suite, une nouvelle étude est nécessaire afin de voir l'impact de ces changements sur la qualité de la production. En effet, cette première analyse met en avant l'intérêt de la maîtrise climatique pour moduler la taille du fruit, mais les qualités organoleptiques ne sont prises en compte que de manière théorique. Ces recherches permettraient d'établir de nouvelles règles de gestion climatique afin d'optimiser le programme Magestan et améliorer la production.

Bibliographie

- Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C. R. J. (2001). Effect of Temperature on the Growth and Development of Tomato Fruits. *Annals of Botany*, 88(5), 869-877. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1524>
- Baldazzi, V., Génard, M., & Bertin, N. (2017). Cell division, endoreduplication and expansion processes: setting the cell and organ control into an integrated model of tomato fruit development. *Acta Horticulturae*, (1182), 257-264. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.31>
- Baldazzi, V., Pinet, A., Vercambre, G., Benard, C., Biais, B., & Genard, M. (2013). In-silico analysis of water and carbon relations under stress conditions. A multi-scale perspective centered on fruit. *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00495>
- Bertin, N., & Génard, M. (2018). Tomato quality as influenced by preharvest factors. *Scientia Horticulturae*, 233, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.056>
- Bougoul, S., Zeroual, S., Boulard, T., & Azil, F. (2007). Simulation numérique du mouvement d'air et de la variation de température dans des serres chauffées. *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda*, 209–212.
- Boulard, T., Roy, J.-C., Pouillard, J.-B., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110-133. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>
- Bournet, P.-E., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 195-217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- Chalabi, Z. S., Bailey, B. J., & Wilkinson, D. J. (1996). A real-time optimal control algorithm for greenhouse heating. *Computers and electronics in agriculture*, 15(1), 1–13.
- Cunha, J. B. (2003). Greenhouse climate models: An overview. In *EFITA Conference* (p. 823–829).
- El-Attal, A. H. (1995). *Decision Model for Hydroponic Tomato Production (HYTODMOD) using utility theory*. The Ohio State University. Consulté à l'adresse https://etd.ohiolink.edu/pg_10?0::NO:10:P10_ETD_SUBID:64670
- Fanwoua, J., Visser, P. H. B. de, Heuvelink, E., Yin, X., Struik, P. C., & Marcelis, L. F. M. (2013). A dynamic model of tomato fruit growth integrating cell division, cell growth and endoreduplication. *Functional Plant Biology*, 40(11), 1098-1114. <https://doi.org/10.1071/FP13007>
- Fanwoua, J., Visser, P. de, Heuvelink, E., Angenent, G., Yin, X., Marcelis, L., & Struik, P. (2012). Response of Cell Division and Cell Expansion to Local Fruit Heating in Tomato Fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 137(5), 294-301.
- Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 135-151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- Fleisher, H. D., Logendra, S. L., Moraru, C., Both, A.-J., Cavazzoni, J., Gianfagna, T., ... Janes, W. H. (2006). Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(1), 125-131. <https://doi.org/10.1080/14620316.2006.11512038>
- Gautier, H., Rocci, A., Buret, M., Grasselly, D., & Causse, M. (2005). Fruit load or fruit position alters response to temperature and subsequently cherry tomato quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6), 1009-1016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2060>
- Génard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.-G., Bussi, C., Basset, J., & Habib, R. (2001). A Biophysical Analysis of Stem and Root Diameter Variations in Woody Plants. *Plant Physiology*, 126(1), 188-202. <https://doi.org/10.1104/pp.126.1.188>
- Grisey, A., Brajeul, E., & Decker, M. (2017). Evolution du parc de serres chauffées en tomate et concombre. *Techniques Serres Chauffées*, (333), 6.

- Heuvelink, E., Batta, L. G. G., & Damen, T. H. J. (1995). Transmission of solar radiation by a multispan Venlo-type glasshouse: validation of a model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1), 41-59. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02184-L](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02184-L)
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427-2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Keulen, H. van, & Challa, H. (1991). A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*, 34(2), 663-672.
- Liu, H.-F., Génard, M., Guichard, S., & Bertin, N. (2007). Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 58(13), 3567-3580. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm202>
- Molz, F. J., & Klepper, B. (1972). Radial Propagation of Water Potential in Stems 1. *Agronomy Journal*, 64(4), 469-473. <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400040018x>
- Qian, T., Dieleman, J. A., Elings, A., Gelder, A. D., & Marcelis, L. F. M. (2015). Response of tomato crop growth and development to a vertical temperature gradient in a semi-closed greenhouse. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 90(5), 578-584. <https://doi.org/10.1080/14620316.2015.11668717>
- Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., ... Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1-22. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v11i1.3210>
- Shamshiri, R. R., Mahadi, M. R., Thorp, K. R., Ismail, W. I. W., & Man, D. A. and H. C. (2017). Adaptive Management Framework for Evaluating and Adjusting Microclimate Parameters in Tropical Greenhouse Crop Production Systems. *Plant Engineering*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69972>
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops : an aid to climate management* (phd). IMAG, Wageningen. Consulté à l'adresse <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/2690>
- Swaef, T. D., & Steppe, K. (2010). Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato. *Functional Plant Biology*, 37(5), 429-438. <https://doi.org/10.1071/FP09233>
- Touzet, C. (1992). *Les reseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme*. Ec2. <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01338010/document>
- van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., van Straten, G., & van Henten, E. J. (2013). Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse**This research is supported by the Dutch Technology Foundation STW, which is part of the Netherlands Organisation for Scientific Research (NWO), and which is partly funded by the Ministry of Economic Affairs. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(18), 282-287. <https://doi.org/10.3182/20130828-2-SF-3019.00026>

Sitographie

- 3Blue1Brown. (2017). *But what *is* a Neural Network? | Chapter 1, deep learning*. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=aircAruvnKk&list=PLZHQObOWTQDNU6R1_67000Dx_ZCJB-3pi
- Barthélémy, S. (2000). Introduction aux Réseaux de Neurones. Consulté 14 août 2018, à l'adresse <http://www.sylbARTH.com/nN.php>
- Berthier, T. (2015, juillet 4). « Inceptionisme », le Neuron-Art selon Google. Consulté 10 avril 2018, à l'adresse <http://echoradar.eu/2015/07/04/inceptionisme-le-neuron-art-selon-google/>
- Chiron, F. (2017). La Tomate en 2016. FranceAgriMer. Consulté à l'adresse <http://www.franceagrimer.fr/content/download/52701/508046/file/BIL-TOMATE-camp2016.pdf>
- Kas als Energiebron. (2018, juin 15). How to impact a crop's vertical temperature profile. Consulté 15 juin 2018, à l'adresse <http://www.hortidaily.com/article/43689/How-to-impact-a-crops-vertical-temperature-profile>
- Varrewaere, M. (s. d.). 2Grow - Communiceer met uw plant. Consulté 23 août 2018, à l'adresse <http://2grow.earth/fr/>

Annexe

Annexe I : Comparaison des durées de croissance des fruits entre les différents scénarios testés

Modalité	Age du fruit (Ch°)	Durée heure	Durée jour	Durée Semaine
S12 +1 degrés	-0.05	86.76	4	1
S12 -1 degrés	0.37	-237.44	-10	-1
S12 +2 degrés	-1.90	176.49	7	1
S12 -2 degrés	1.51	-294.92	-12	-2
S12froidbot	-0.33	20.27	1	0
S12froidmid	0.23	-29.04	-1	0
S12froidtop	0.31	-26.45	-1	0
S12froidmidtop	-0.06	-75.20	-3	0

Légende : Tableau des différentes moyennes d'âges des fruits à leurs maturités et des durées de croissance en heure, jour et semaine. La comparaison est faite par rapport aux âges et temps de développement simulés avec les températures médianes pour les modalités plus ou moins un ou deux degrés, et par rapport à l'âge et temps de développement simulés d'après les températures de la serre 12 pour les modalités de changements de température par niveau (S12froidbot, S12froidmid, S12froidtop, S12froidmidtop). L'écart est positif dans le cas où la modalité dépasse la valeur témoin et à l'inverse il est négatif dans le cas où la modalité est inférieure à la donnée témoin.

Annexe II- Tableau résumé des expérimentations effectuées dans les serres

Expérimentation	Serre 12	Serre 13
Mesure du flux de sève et diamètre de tige	X	X
Mesure de l'hétérogénéité climatique		X
Mesure des degrés heure reçu par les fruits	X	X
Essai ventilation		X

Légende : Tableau des expérimentations effectuées dans les compartiments, une croix signifiant que l'expérimentation désignée a eu lieu dans cette serre.

Annexe III- Tableau des dates de début de croissance et récoltes des différents bouquets des serres 12 et 13

Serre 12		Serre 13	
Semaine de début et de fin de croissance	Bouquet	Semaine de début et de fin de croissance	Bouquet
2 -11	1	2-11	1
3-13	2	3-12	2
4-14	3	4-13	3
5-15	4	5-14	4
6-16	5	6-15	5
8-17	6	7-17	6
9-19	7	9-17	7
10-19	8	10-19	8
13-21	9	11-20	9
14-22	10	12-21	10
14-22	11	13-22	11
15-23	12	14-22	12
16-24	13	15-23	13
17-25	14	16-24	14
18-26	15	17-25	15
19-27	16	18-26	16
20-28	17	19-27	17
21-29	18	21-28	18
21-30	19	22-29	19
24-31	20	23-30	20
25-33	21	24-31	21
25-34	22	25-33	22
27-35	23	26-34	23
28-36	24	27-34	24
28-37	25	28-36	25
29-39	26	29-37	26
31-40	27	30-39	27
32-41	28	31-40	28
33-42	29	32-41	29
35-43	30	33-42	30

Légende : Tableau résumant les dates de début et de fin de croissance pour chaque bouquet, en semaine (date de début – date de fin) pour l'année 2017.



Diplôme: Master

Mention : Biologie Végétale (BV)

Parcours : Qualité des Productions Spécialisées

Auteur(s) : Emilie Legast
Date de naissance : 1995

Nb pages : 30 Annexe(s) : 3

Année de soutenance : 2018

Organisme d'accueil : CTIFL Carquefou (44)
Adresse : CTIFL • ZI Belle Étoile - Antarès
35 allée des Sapins - 44483 Carquefou
Maître de stage : TRUFFAULT Vincent

Magestan, Utilisation de modèle pour une conduite de culture de tomates hors sol optimisée :

Optimisation de la modélisation de la croissance de fruit

Magestan, Using a model for optimized tomato crop management: Optimizing the modeling of fruit growth

Résumé :

La production de tomate représente une large partie du marché des légumes en France. Une partie est produite en culture sous serre chauffée, ce qui représente de nombreux avantages mais aussi un défi. C'est dans le but d'assister la production que le projet Magestan a été initié avec pour objectif le pilotage de la serre par un programme autonome. Celui-ci doit prédire les conditions climatiques de la serre, les besoins de la culture et le cout des actions de gestion afin d'obtenir une conduite culturelle optimisée pour un bon rendement et un fruit de qualité. Ce programme est composé en deux parties qui sont actuellement en développement. La première a pour but de décrire le climat de la serre. Afin d'être précis le programme doit couvrir un grand nombre de paramètres dont l'hétérogénéité climatique : en effet, la répartition de la température dans la serre n'est pas homogène. Pour la prendre en compte et la maîtriser par le programme il faut connaître ses caractéristiques et les moyens de l'influencer. Cette étude a donc permis de caractériser la répartition des températures au sein de la serre et de mettre en avant la vitesse de ventilation comme levier possible pour la maîtrise des gradients. Il a été aussi établi que l'hétérogénéité des températures a un impact sur la croissance des fruits, grâce au modèle utilisé dans le cadre de cette étude. En effet, la taille du fruit est réduite lorsqu'il reçoit des températures trop chaudes durant la phase de division cellulaire. Cette étude propose la mise en place d'une stratégie de gestion climatique en intégrant l'emplacement du fruit dans la serre. La partie décrivant la plante développée dans le programme Magestan manque également d'un descripteur de la plante faisant une interface avec le climat actuel du compartiment. Les mesures de flux de sève et de diamètre de tige combinées ont été étudiées et donnent des indications sur le climat, l'activité de la plante, et son état hydrique. Ces observations alimentent à la fois le modèle climat et plante du programme Magestan.

Abstract : Tomato production takes a large part of the vegetable market in France. Part of it is produced under heated greenhouse, which represents many advantages but also a challenge for growers. An innovative project entitled Magestan was initiated with the objective to assist greenhouse management through an autonomous program. It must predict the climate conditions of the greenhouse, crop needs and the economic cost of every changing state of greenhouse actuators in order to obtain a cultural management optimized for better yield and fruit quality. This autonomous program consists of two parts that are currently under development. The first leads to describe the climate of the greenhouse. In order to be precise, the program must cover a large number of parameters including climatic heterogeneity: indeed, temperature distribution within the greenhouse is not homogeneous. To take it into account and master it by the program you have to know its characteristics and the means to influence it. This study has made it possible highlights the impact of fan speeds on vertical and horizontal temperature gradients. Using modelling tools, it has also been established that the heterogeneity of temperatures has an impact on fruit growth. Indeed, the size of the fruit is reduced when it receives warm temperatures during the cell division phase. This study proposes the implementation of a climate management strategy by integrating the location and needs of the fruit in the greenhouse. Plant models developed in the Magestan program also lack a real-time descriptor of the plant physiology interfaced with the compartment's current climate. Combining sap flow and stem diameter measurements give us indications on the climate, the activity of the plant, and its hydric state. These observations feed both climate and plant models of the Magestan program

Mots-clés : Modélisation, flux de sève, distribution du climat, température, tomate, croissance du fruit

Key Words: modeling, sap flow, climate distribution, temperature, tomato, fruit growth