



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS
Cedex 01



Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor,
CS 46510 - 35065
RENNES Cedex



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuc
CS 84 215, BP 35042
RENNES Cedex

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé Mention Biologie et Technologie du Végétal Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées
Option : Filière de l'horticulture et du végétal urbain

Année universitaire 2014-2015

Analyse du climat dans les serres de concombre – Comparaison entre site expérimental et site de production

Par : Clément PINOIT

Soutenu à Angers le : 15 septembre 2015

Maîtres de stage : Pierre-Emmanuel BOURNET, Etienne CHANTOISEAU (Agrocampus Ouest)



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS
Cedex 01



Université de Rennes I
1, 2 rue du Thabor,
CS 46510 - 35065
RENNES Cedex



AGROCAMPUS OUEST
65 rue de St Brieuc
CS 84 215, BP 35042
RENNES Cedex

Mémoire de Fin d'Etudes

Master 2 Sciences Technologie Santé Mention Biologie et Technologie du Végétal Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées
Option : Filière de l'horticulture et du végétal urbain

Année universitaire 2014-2015

Analyse du climat dans les serres de concombre – Comparaison entre site expérimental et site de production

Par : Clément PINOIT

Soutenu à Angers le : 15 septembre 2015

Maîtres de stage : Pierre-Emmanuel BOURNET, Etienne CHANTOISEAU (Agrocampus Ouest)

AUTORISATION DE DIFFUSION EN LIGNE

STUDENT(E)

N° étudiant : 14004317

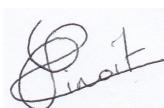
Email : clement.pinoit@laposte.net

Je soussigné(e) Clément PINOIT être l'auteur du document intitulé « Analyse du climat dans les serres de concombre – Comparaison entre site expérimental et site de production » préparé sous la direction de Pierre-Emmanuel BOURNET et Etienne CHANTOISEAU et soutenu le 15 septembre 2015.

Je certifie la conformité de la version électronique déposée avec l'exemplaire imprimé remis au jury, certifie que les documents non libres de droits figurant dans mon mémoire seront signalés par mes soins et pourront être retirés de la version qui sera diffusée en ligne par le Service Commun de la Documentation de l'Université d'Angers. Agissant en l'absence de toute contrainte, et sachant que je dispose à tout moment d'un droit de retrait de mes travaux, j'autorise, sans limitation de temps, l'Université d'Angers à les diffuser sur internet dans les conditions suivantes :

- | |
|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> diffusion immédiate du document en texte intégral |
| <input type="checkbox"/> diffusion différée du document en texte intégral ; date de mise en ligne : |
| <input type="checkbox"/> n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |

À Angers, le 28/08/2015 Signature :



JURY DE SOUTENANCE

- | |
|--|
| <input type="checkbox"/> autorise la diffusion immédiate du document en texte intégral
<i>OU</i> |
| <input type="checkbox"/> autorise la diffusion différée du document en texte intégral ; à compter du : |
|
 |
| <input type="checkbox"/> en libre-accès <i>OU</i> <input type="checkbox"/> en accès restreint |
|
 |
| <input type="checkbox"/> sous réserve de corrections |

OU

- | |
|--|
| <input type="checkbox"/> n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers |
|--|

À Angers, le-----

Nom et Signature du maître de stage:

Nom et Signature du président de jury:

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT**M2 PROTeV****2014-2015**

Je, soussigné (e) :

Clément PINOIT

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.

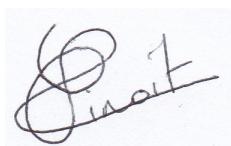
En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour ce rapport, rédigé au cours de mon master 2 Production et Technologie du Végétal (ProTeV).

Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : ANGERS

Le : 28/08/2015

Signature :



Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Mme Emmanuelle Chevassus-Lozza, directrice du centre d'Angers d'Agrocampus Ouest pour son accueil dans son établissement.

Je souhaite remercier M. Pierre-Emmanuel Bournet et M. Etienne Chantoseau, mes maîtres de stages pour m'avoir accompagné lors de mon stage, pour avoir partagé leur expertise sur la bioclimatologie, la physique, la culture sous serre... et pour m'avoir aidé dans l'exploitation des données et la rédaction de ce rapport.

Je souhaite également remercier M. Eric Brajeul, directeur du Ctifl de Carquefou pour m'avoir accueilli au sein de sa structure et autorisé à y réaliser des relevés tout en réduisant mes déplacements.

Je remercie M. Benjamin Albert et M. Serge Le Quillec, ingénieurs au Ctifl, pour leurs conseils et explications sur la physiologie des plantes et leurs adaptations à l'environnement de la serre.

De plus, je souhaite remercier les techniciens d'Agrocampus Ouest, messieurs Dominique Lemesle et Dominique Renard pour leurs aide à l'installation des capteurs et leurs explications sur leur fonctionnement ainsi que ceux du Ctifl, messieurs Dominique Lesourd, Denis Loda et Romain Barette pour leurs explications et démonstrations sur la gestion du climat et la culture sous serre.

Enfin, je souhaite remercier l'équipe technique du Ctifl et mes collègues stagiaires qui m'ont accompagné durant ce stage.

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	AGROCAMPUS OUEST ET L'UNITE PROPRE EPHOR.....	1
1.2	CONTEXTE ET ENJEUX	1
1.3	LE PROJET CONSER.....	1
1.4	PROBLEMATIQUE DU STAGE	2
1.5	ETAT DE L'ART SUR LES CULTURES MARAICHERES SOUS SERRE ET LEUR INTERACTION AVEC LE CLIMAT LOCAL	2
1.5.1	<i>Le climat dans les serres</i>	3
1.5.1.1	Température.....	3
1.5.1.2	Hygrométrie	4
1.5.2	<i>Effets du climat sur la plante/Interactions des végétaux avec le climat</i>	5
1.5.2.1	Température de plante.....	5
1.5.2.2	Effets de la température sur la plante.....	6
1.5.2.3	Effet de l'humidité sur les plantes	8
1.5.3	<i>Moyens d'action sur le climat dans les serres</i>	9
1.5.3.1	Chauffage	9
1.5.3.2	Isolation	9
1.5.3.3	Refroidissement	10
1.5.3.4	Déshumidification.....	10
1.5.4	<i>Pilotage du climat.....</i>	10
1.5.4.1	Prise en compte du développement des végétaux.....	10
1.5.4.2	Energie.....	11
1.5.4.3	Intégration de température.....	11
2	MATERIEL ET METHODE.....	12
2.1	LE CONCOMBRE <i>CUCUMIS SATIVUS</i>	12
2.2	LES CHAINES DE CAPTEURS.....	12
2.3	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	13
2.3.1	<i>Serre de production (SCEA Cheminant)</i>	13
2.3.2	<i>Serre expérimentale (Ctifl).....</i>	14
2.3.3	<i>Calendrier de mise en œuvre du protocole.....</i>	14
2.4	METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES CLIMATIQUES	15
2.4.1	<i>Les différentes unités d'humidité</i>	15
2.4.2	<i>Etude des risques de condensation</i>	15
2.4.3	<i>Traitemennt des données</i>	15
3	RESULTATS.....	16
3.1	ETUDE DU CLIMAT CHEZ LE PRODUCTEUR (AXE 1).....	16
3.1.1	<i>Dans les conditions printanières (du 12 mars au 29 avril).....</i>	16
3.1.1.1	Hétérogénéité horizontale	16
3.1.1.2	Hétérogénéité verticale	17
3.1.2	<i>Dans les conditions estivales (du 24 juin au 15 juillet)</i>	18
3.1.2.1	Hétérogénéité horizontale	18
3.1.2.2	Hétérogénéité verticale	20
3.2	COMPARAISON ENTRE SERRE EXPERIMENTALE ET SERRE DE PRODUCTION (AXE 2)	20
3.3	COMPARAISON DE DEUX MODALITES DE CHAUFFAGE DANS LES SERRES EXPERIMENTALES (AXE 3).....	21
3.4	COMPARAISON DE DEUX MODALITES DE BRASSAGE D'AIR DANS LES SERRES EXPERIMENTALES (AXE 3)	23
3.5	COMPARAISON DES DONNEES AVEC LES CAPTEURS PILOTES	24

3.5.1	<i>Comparaison avec les capteurs du producteur</i>	24
3.5.2	<i>Comparaison avec les capteurs du Ctifl</i>	25
3.6	ETUDE DES TEMPERATURES DE FEUILLES ET DE FRUITS	25
4	DISCUSSION	26
4.1	ETUDE DU CLIMAT CHEZ LE PRODUCTEUR (DU 12 MARS AU 29 AVRIL)	26
4.1.1	<i>Hétérogénéité horizontale</i>	26
4.1.2	<i>Hétérogénéité verticale</i>	27
4.2	COMPARAISON ENTRE SERRE EXPERIMENTALE ET SERRE DE PRODUCTION	27
4.3	COMPARAISON DE DEUX MODALITES DE CHAUFFAGE DANS LES SERRES EXPERIMENTALES (AXE 3).....	29
4.3.1	<i>Effet de la position des tuyaux de chauffage de végétation</i>	29
4.3.2	<i>Effet du brassage d'air</i>	29
4.3.3	<i>Etude de la température de fruit et de feuille</i>	29
4.3.4	<i>Conséquences agronomiques</i>	29
5	CONCLUSION	30
6	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31

Liste des abréviations

ACO : Agrocampus Ouest
ARELPAL : Association régionale d'expérimentation légumière des Pays de la Loire
AVS : Active ventilation system
Ctifl : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
DH : Déficit hydrique
DPV : Déficit de pression vapeur
EPHor : Environnement physique de la plante horticole
Hr : Humidité relative
Ha : Humidité absolue
LAI : Leaf area index
MTD : Maximum temperature difference
RZ : Rijk Zwaan
SCEA : Société civile d'exploitation agricole
T : Température
 T_{ext} : Température extérieure
UP : unité propre

Liste des figures

- Figure 1* Représentation schématique du mouvement d'air dans la serre (Majdoubi et al., 2009)
- Figure 2* Profil vertical de températures mesurées d'air et de feuilles en fonction du temps (moyennes de température sur 4 heures). La ligne horizontale représente la hauteur de la canopée (Yang et al., 1990).
- Figure 3* Diagramme de l'air humide annoté
- Figure 4* Modélisation de la répartition verticale de l'humidité spécifique ($\text{Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air}}$) en serre de tomate (Majdoubi et al., 2009)
- Figure 5* Schéma présentant le nombre de jours nécessaires pour passer d'un stade de développement à un autre en fonction de la température (E. Chantoiseau, cours thermique)
- Figure 6* Photographie des tuyaux de chauffages (Ctifl)
- Figure 7* Schéma de la conduite de température classique et de la conduite en intégration de température (E. Chantoiseau, cours thermique)
- Figure 8* Dessin de *Cucumis sativus* L. (<http://www.uniprot.org/taxonomy/3659>)
- Figure 9* Schéma et photographie de la position verticale des capteurs
- Figure 10* Schéma d'un capteur d'humidité relative et photographie de son installation
- Figure 11* Photographie d'un thermocouple fixé sur une feuille
- Figure 12* Photographie des écrans d'ombrage (Ctifl)
- Figure 13* Schéma de la disposition des gouttières et réseaux de chauffage. Distance entre les éléments chez le producteur et au Ctifl.
- Figure 14* Schéma de la position des capteurs dans le compartiment 9 de la SCEA Cheminant (à gauche) et dans la serre 13 du Ctifl (à droite)
- Figure 15* Calendrier des cultures dans les deux structures et des positions des capteurs
- Figure 16* Répartition horizontale de la température en journée en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 9 avril (moyenne mobile 2h)
- Figure 17* Répartition horizontale de la température la nuit du 24 au 25 mars en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite)
- Figure 18* Répartition horizontale de l'humidité le 6 avril en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) à la SCEA Cheminant (moyenne mobile 2h)
- Figure 19* Répartition horizontale de l'humidité la nuit du 24 au 25 mars en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) à la SCEA Cheminant
- Figure 20* Evolution de l'écart de température entre le point le plus haut et le point le plus bas de la canopée en fonction du rayonnement cumulé
- Figure 21* Répartition verticale de la température à la SCEA Cheminant la nuit du 5 au 6 avril
- Figure 22* Répartition verticale de l'humidité la nuit du 5 au 6 avril (à gauche) et la journée du 14 avril (à droite) à la SCEA Cheminant
- Figure 23* Moyennes de température de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des stations Est et Centrale de la SCEA Cheminant
- Figure 24* Moyennes d'humidité de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des stations Est et Centrale à la SCEA Cheminant
- Figure 25* Moyennes de température de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des différentes hauteurs de la station centrale de la SCEA Cheminant
- Figure 26* Moyennes d'humidité de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des différentes hauteurs de la station centrale de la SCEA Cheminant
- Figure 27* Comparaison des moyennes de température sur 24h au Ctifl et chez le producteur en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite)
- Figure 28* Comparaison des températures au Ctifl et chez le producteur. Comparaison avec les consignes de chauffage et d'aération.
- Figure 29* Comparaison des moyennes d'humidité sur 24h au Ctifl et chez le producteur en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite)

Figure 30 Comparaison des humidités au Ctifl et à la SCEA Cheminant la nuit du 16 au 17 mai et la journée du 17 mai. Les valeurs présentées sont les moyennes mobiles sur 2h.

Figure 31 Ecart de température en fonction de la position du Forcas (moyenne 24h)

Figure 32 Différence de température entre le haut et la bas de la canopée selon la position du Forcas (moyennes 24h)

Figure 33 Comparaison de l'humidité en haut de la canopée en fonction de la position des tuyaux de chauffage de végétation

Figure 34 Comparaison de l'humidité en bas de la canopée en fonction de la position des Forcas

Figure 35 Comparaison de la température en présence et en absence de brassage d'air en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 4 juin (moyenne mobile 2h)

Figure 36 Comparaison des gradients verticaux de température en absence de brassage d'air (à gauche) et avec un brassage de 5 volumes de serre par heure (à droite) le 4 juin (moyenne mobile 2h)

Figure 37 Comparaison des humidités en fonction du brassage d'air en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 27 mai (moyennes mobiles 2h)

Figure 38 Comparaison des gradients verticaux d'humidité en absence de brassage d'air (à gauche) et avec un brassage de 5 volumes de serre par heure (à droite) le 27 (moyenne mobile 2h)

Figure 39 Comparaison des moyennes sur 24h des capteurs de la SCEA Cheminant et de ceux d'Agrocampus Ouest. A gauche les données d'humidité relative et à droite celles de température.

Figure 40 Comparaison entre les températures du capteur d'Agrocampus Ouest et du capteur du producteur le 23 avril.

Figure 41 Comparaison des moyennes sur 24h des capteurs d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) d'Agrocampus Ouest et du Ctifl.

Figure 42 Comparaison des températures de feuilles obtenues avec un thermocouple ou avec une caméra infrarouge la nuit du 16 au 17 mai et la journée du 17 mai au Ctifl

Figure 43 Comparaison de la température d'une feuille en haut de la canopée au niveau de la station Ouest avec la température au point de rosée la nuit du 12 au 13 mars.

Figure 44 Comparaison de la température d'un fruit en haut de la canopée de la station centrale de la modalité Forcas haut avec la température au point de rosée le 18 juin

Figure 45 Température de feuille et de fruit en haut de la canopée le 17 juin

Figure 46 Température de feuille et de fruit en bas de la canopée le 17 juin

Figure 47 Photographies des plantes à la SCEA Cheminant le 25 juillet.

Figure 48 Comparaison de la position des ouvrants au côté à l'abris du vent entre les deux sites le 17 mai

Figure 49 Comparaison de la position des ouvrants au côté exposé au vent entre les deux sites le 17 mai

Figure 50 Photographie des symptômes de la seconde culture au Ctifl

1 Introduction

1.1 Agrocampus Ouest et l'unité propre EPHor

Ce stage est réalisé sous la direction de Pierre-Emmanuel Bournet et Etienne Chantoiseau, au centre angevin d'Agrocampus Ouest. Pierre-Emmanuel Bournet est directeur de l'unité propre (UP) Environnement Physique de la plante Horticole (EPHor) et Etienne Chantoiseau y est enseignant chercheur.

Agrocampus Ouest est un organisme public travaillant dans le secteur de l'agronomie et du paysage. Il a une approche intégrative et pluridisciplinaire (du gène à l'agrosystème) et une approche territoriale (du local au global). Cette structure a trois vocations : la formation, la recherche et le développement, qu'elle réalise selon trois valeurs : la responsabilité vis-à-vis de l'environnement, la diversité et l'innovation. Agrocampus Ouest travaille en partenariat avec d'autres structures dont l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et l'université d'Angers.

L'UP EPHor mène des activités de recherche selon deux axes : le comportement hydrodynamique des substrats horticoles et des sols urbains reconstitués et la bioclimatologie de la plante en conditions climatiques contrôlées. Ce stage s'inscrit dans ce deuxième axe.

1.2 Contexte et enjeux

Le département Loire-Atlantique est le premier producteur de concombre de France (tous modes de production confondus) avec 16% du volume national récolté en 2011 (soit 18 700 tonnes) (FranceAgriMer, 2012). Cette culture présente donc un intérêt économique certain. En 2012, 72,2% des surfaces de productions de concombre en France sont des serres chauffées (FranceAgriMer, 2013), permettant une forte productivité pendant la majorité de l'année (trois cultures par an). Un des problèmes de ce type de culture est la forte consommation énergétique, entraînant des coûts importants (20 à 40% du coût total, selon les exploitations) et ayant un impact environnemental. Il paraît donc nécessaire d'améliorer l'efficience énergétique, tout en maintenant le niveau de productivité et la qualité des fruits.

1.3 Le projet CONSER

Pour répondre, au moins en partie à ces enjeux, le projet CONSER (Culture de concombre sous serre) a été initié en 2014. L'objectif de ce projet est de mettre au point une conduite climatique pour la culture du concombre sous serre chauffée. Cette conduite devra avoir une productivité accrue (en quantité et en qualité), une meilleure efficience énergétique et hydrique et permettre une meilleure gestion des ravageurs. Le projet dans sa globalité se déroule sur trois ans (2014-2016) et réunit six partenaires :

- L'association régionale d'expérimentation légumière des Pays de la Loire (ARELPAL) est le maître d'œuvre et assure la gestion financière (*via* le conseil régional des Pays de la Loire, France Agrimer et les cotisations des maraîchers)
- Le centre interprofessionnel des fruits et légumes (Ctifl), centre de Carquefou est le chef de file du projet (actions 1, 2, 3, 4, 6)
- Le comité régional de développement maraîcher (CDDM) (actions 1, 5, 6)
- L'unité EPHor d'Agrocampus Ouest (actions 2, 3, 6)

- HortiMaX France (actions 4, 6)
- La SCEA Cheminant

Ce projet a reçu la validation des producteurs serristes de concombre du bassin nantais. Pour ce faire, le projet se divise en six actions. La première consiste en la réalisation d'un état de l'art, la seconde en l'acquisition de référentiels physiologiques, la troisième en l'évaluation et la comparaison de différentes conduites climatiques et de nouveaux équipements techniques en vue d'améliorer l'efficience de la culture, la quatrième au développement d'un capteur infrarouge de température de fruit, la cinquième en la validation des résultats sur site pilote professionnel et la dernière en la valorisation de ces résultats (communication et diffusion). Nous nous intéresserons principalement à l'action 3 dans le cadre de notre stage.

1.4 Problématique du stage

La problématique du stage concerne la transposition des résultats obtenus lors d'expérimentations dans des serres de petite taille (environ 300 m²) à la production sous serre maraîchère (2 ha). En effet les serres expérimentales étant bien plus petites que celles de producteurs, il est légitime de se demander si les conditions sont les mêmes dans les deux types de structures et donc si les résultats obtenus dans les structures expérimentales sont applicables chez les producteurs. Pour répondre à cette question, le stage s'articulera autour de trois axes.

- Le premier axe consiste en une **étude du climat** (température de l'air, température de feuille, hygrométrie) **et de son hétérogénéité chez un producteur** (SCEA Cheminant, Carquefou, 44). Elle sera accompagnée d'une comparaison des données acquises par les capteurs de l'équipe EPHor avec les données de la centrale du producteur permettant de piloter le climat dans sa serre. Cette première étude devra répondre aux questions suivantes : le climat est-il homogène sur les plans horizontaux et verticaux dans les serres des producteurs ? Si non, quel est le degré d'hétérogénéité, quand est-elle la plus élevée, y a-t-il des zones/moments à risque (notamment en terme de condensation) ? Les capteurs utilisés par le producteur pour piloter sa conduite climatique sont-ils fiables ?
- Le second axe consiste en une **comparaison entre le climat dans la serre du producteur** (SCEA Cheminant) **et une serre d'expérimentation** (Ctifl de Carquefou). Les questions étant : le climat est-il différent entre les deux structures, de tailles différentes ? Si oui, est-il possible de quantifier et d'expliquer cette différence ? Remet-elle en cause la transposition des résultats expérimentaux obtenus au Ctifl ?
- Le troisième axe consiste en **la comparaison des effets sur le climat de deux modalités de chauffage** (deux hauteurs de chauffage de végétation) **et deux modalités de brassage d'air** (pas de brassage et un brassage de 5 volumes de serre par heure) au Ctifl. Ces modalités entraînent-elles des différences de répartition de l'humidité et de la température (verticale notamment). De plus, la température des fruits et les **risques de condensation** sur ceux-ci seront étudiés. Enfin, les températures de feuilles obtenues par les capteurs de l'équipe EPHor seront comparées aux températures de feuilles mesurées par les caméras infrarouges (IR) du Ctifl.

1.5 Etat de l'art sur les cultures maraîchères sous serre et leur interaction avec le climat local.

Le phénotype d'une plante dépend de l'interaction entre son génotype et son environnement. Afin d'obtenir des produits de qualité et des rendements intéressants, les producteurs jouent sur ces

deux leviers. Ils interviennent sur la génétique *via* le choix des cultivars, ceux-ci ayant été préalablement sélectionnés selon les qualités souhaitées (*e.g.* qualité des fruits, vitesse de croissance, résistances à certaines maladies). Quant à l'environnement des plantes, il existe de multiples manières de le contrôler, de la plus simple à la plus complexe. La production hors sol sous serre en verre permet d'avoir un contrôle très complet de l'environnement des cultures. En effet, de nombreux équipements pilotés par des capteurs permettent un ajustement des paramètres (climat, irrigation, fertilisation...) aux besoins des plantes. Par exemple, les différents systèmes de chauffage permettent de maintenir une température optimale, les aérations réglables permettent de maîtriser l'humidité, les diffuseurs de dioxyde de carbone (CO₂) permettent d'augmenter la teneur en gaz carbonique... Dans cette analyse bibliographique, seront donc abordés : le climat dans les serres, sa gestion et son impact sur le développement des végétaux et des ravageurs. Ainsi, il sera possible d'évaluer les conséquences des différences observées dans le climat au sein d'une serre et entre deux serres.

1.5.1 Le climat dans les serres

1.5.1.1 Température

1.5.1.1.1 Rayonnement et effet de serre

Le climat dans les serres est dépendant du climat extérieur. Le principal facteur est le rayonnement puisqu'il permet l'augmentation de la température à l'intérieur par effet de serre : les rayons de courtes longueurs d'ondes émis par le soleil arrivent au niveau des parois de la serre. Une partie de ces rayons est réfléchie par ces parois, une partie est absorbée et le reste est transmis (de 50 à 80% selon le type de parois) à l'intérieur de la serre. Ces rayons transmis sont absorbés par des composés présents dans la serre (les plantes et le sol principalement). Une partie de ce rayonnement absorbé peut être réémis sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge, $\lambda > 5\mu\text{m}$). L'énergie du rayonnement émis dépend de l'émissivité du corps et de sa température ($E = \varepsilon\sigma T^4$, ε étant l'émissivité du corps, σ la constante de Boltzman et T sa température). Ces rayonnement IR sont porteurs d'énergie thermique et sont en partie réfléchis par les parois de la serre, le verre étant opaque aux grandes longueurs d'onde (environ 50% des IR sont réfléchis par les parois) : il y a donc une élévation de la température. Une surface soumise au rayonnement peut avoir une température jusqu'à 10°C au-dessus de la température de l'air (de Parceveaux et Hubert, 2007).

1.5.1.1.2 Conduction

La température extérieure a également beaucoup d'impact sur le climat dans la serre : les parois n'étant pas isolées, il y a des échanges thermiques par conduction (selon la loi de Fourier) dans l'épaisseur de la paroi de verre. Ceci peut entraîner une perte de chaleur lorsque l'air extérieur est plus froid ou un gain de chaleur lorsqu'il est plus chaud. De même, il y a des échanges de chaleur entre l'air de la serre et le sol.

1.5.1.1.3 Convection

La convection correspond aux mouvements internes dans un fluide entraînant des transferts de chaleur ou de quantité de mouvement (de Parceveaux, 1990). Pour le cas de la température, la convection naturelle est le fait que l'air chaud monte, la convection forcée étant celle induite par le vent. Ce processus peut être utile aux producteurs afin de déshumidifier passivement les serres : lorsque les ouvrants sont ouverts, l'air chaud et humide monte et est évacué vers l'extérieur. La dépression ainsi créée entraîne l'entrée d'air extérieur, plus sec.

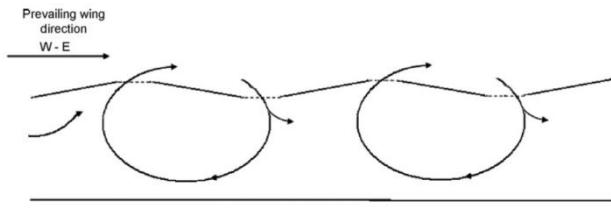


Figure 1 Représentation schématique du mouvement d'air dans la serre (Majdoubi et al., 2009)

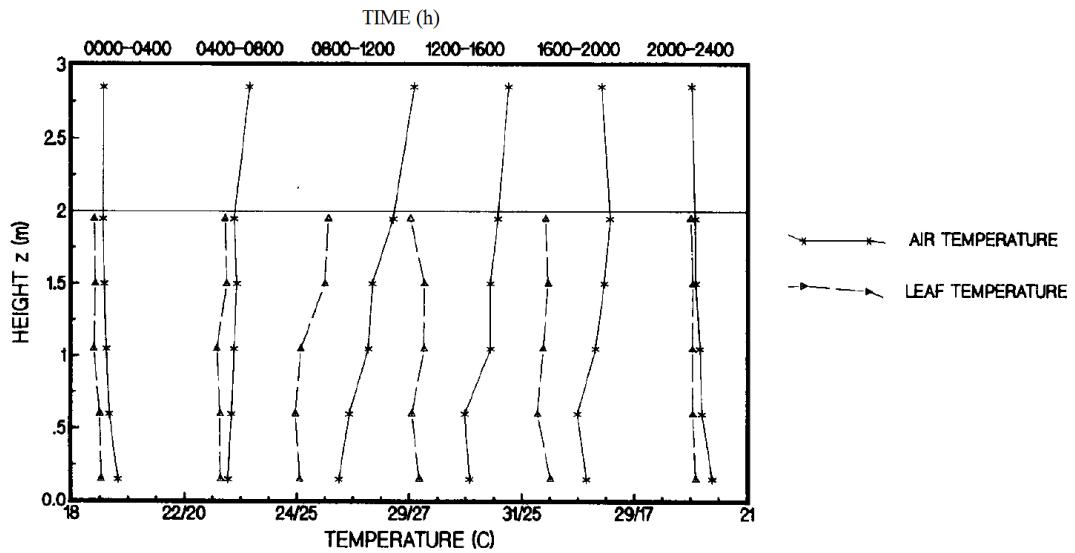


Figure 2 Profil vertical de températures mesurées d'air et de feuilles en fonction du temps (moyennes de température sur 4 heures). La ligne horizontale représente la hauteur de la canopée (Yang et al., 1990).

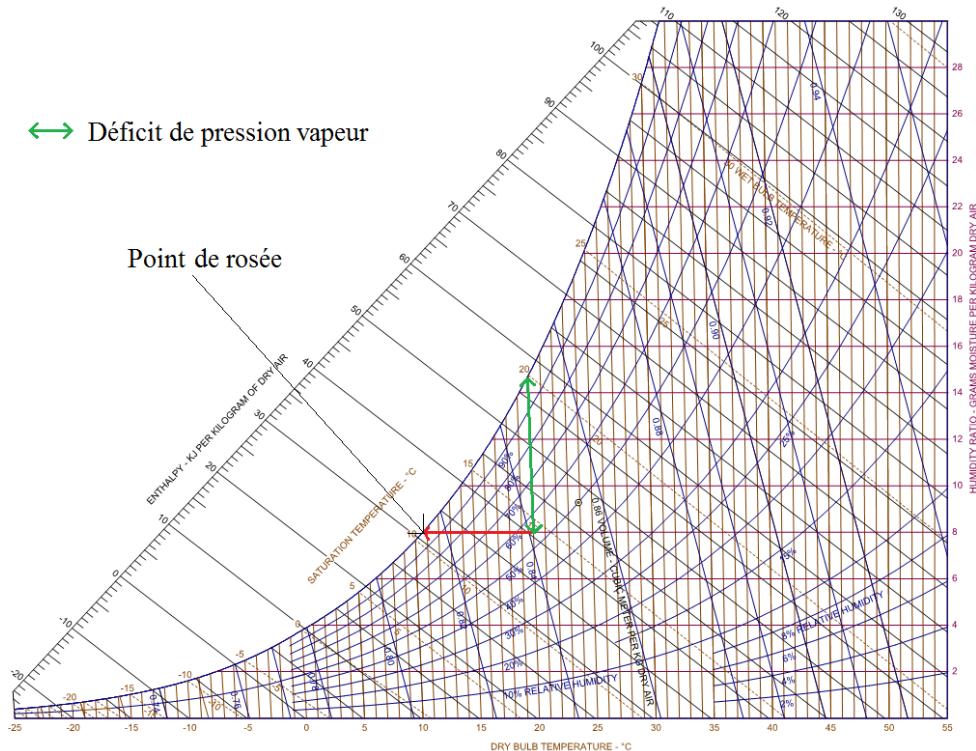


Figure 3 Diagramme de l'air humide annoté (cours Etienne Chantoiseau, serre - déshumidification)

1.5.1.1.4 Hétérogénéité dans les serres

La température n'est pas homogène au sein d'une serre. En effet, les températures les plus élevées sont confinées autour des zones interceptant les radiations solaires et limitant les déplacements d'air : le toit, le sol et les plantes. Les températures d'air sont généralement plus élevées du côté d'où vient le vent. De plus, elles sont plus homogènes au-dessus de la canopée que dans celle-ci. Une disposition des rangs parallèle au flux d'air permet de diminuer la température. Il y a souvent un léger courant d'air inverse au sens du vent dans la canopée ainsi que des circulations convectives entre la canopée et le toit (figure 1) (Majdoubi *et al.*, 2009). Le jour, la température de l'air dans les serres augmente avec la hauteur. En fin de nuit, elle décroît avec la hauteur (figure 2) (Yang *et al.*, 1990).

1.5.1.2 Hygrométrie

1.5.1.2.1 Humidité dans les serres

L'humidité de l'air est un paramètre très important pour la culture sous serre. Elle est principalement fonction des conditions climatiques extérieures (précipitations, anticyclones...) et de la transpiration des plantes. Elle est particulièrement étudiée pour son implication dans la régulation de la transpiration et pour les risques de condensation pouvant induire la germination de spores d'agents pathogènes. Elle influe également sur la température puisque l'eau a un pouvoir d'absorption des IR plus élevé que l'air, elle participe donc à l'effet de serre.

1.5.1.2.2 Condensation

La condensation dépend de la température (cf diagramme de l'air humide, figure 3). En effet, à une température donnée, la quantité d'eau contenue dans l'air ne peut dépasser une valeur (loi de Clausius Clapeyron). Si la quantité d'eau dépasse cette valeur, il y a saturation. La différence entre la quantité d'eau maximale que peut contenir l'air et la quantité qu'il contient est appelée déficit de pression vapeur, il est représenté par une flèche verte sur la figure 3. De même, pour une humidité absolue donnée (exprimée en masse d'eau par masse d'air sec), si la température descend sous une certaine valeur (température de rosée ou « *dew point* ») il y a condensation (flèche rouge). Ainsi, si un solide ayant une température inférieure au point de rosée d'une masse d'air est placé dans cette masse d'air, de la condensation se forme dessus. En serre, il arrive souvent que l'eau condense sur les parois ou les châssis métalliques. Ceci diminue transmission de la lumière et est donc préjudiciable au bon développement des plantes.

1.5.1.2.3 Evaporation

L'hygrométrie a une forte influence sur l'évaporation puisque le pouvoir évaporant de l'air dépend du déficit de saturation (*i.e.* la différence entre la pression vapeur maximale dans l'air et la pression vapeur réelle). L'évaporation consiste en un changement d'état de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état vapeur lorsque la température est inférieure à la température d'ébullition. Le taux d'évaporation dépend du déficit hydrique de l'air (plus celui-ci est élevé, plus le taux d'évaporation est important). L'évaporation, quelle que soit la température, se réalise avec un échange de chaleur latente (pour l'évaporation) contre de la chaleur sensible, mesurable par la température et entraîne donc une diminution de celle-ci. L'énergie nécessaire à l'évaporation est essentiellement fournie par l'énergie solaire et l'advection ("processus de transport par le vent moyen" (de Parceveaux, 1990)). Un couvert végétal bien alimenté en eau émet environ la même quantité de vapeur d'eau qu'une

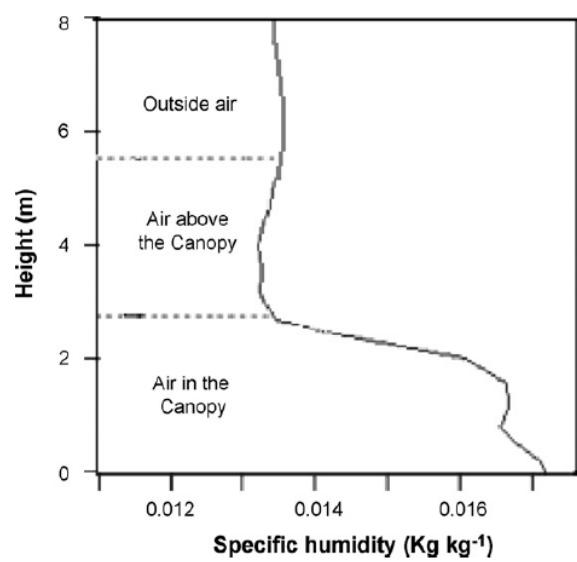


Figure 4 Modélisation de la répartition verticale de l'humidité spécifique ($\text{Kg}_{\text{eau}}/\text{Kg}_{\text{air}}$) en serre de tomate (Majdoubi et al., 2009)

surface d'eau libre. L'évaporation d'eau à la surface des feuilles est régie par deux forces : la tension superficielle et la capillarité. La tension superficielle correspond à la force de cohésion d'un liquide avec lui-même. La capillarité est le travail d'adhésion du liquide par unité de surface du solide (de Parceveaux et Hubert, 2007). Dans le cas des plantes, l'émission de vapeur d'eau va également être dépendante de la résistance stomatique (*i.e.* la capacité de la vapeur d'eau à traverser les stomates). La résistance stomatique va être régulée par la plante *via* l'ouverture et la fermeture des stomates.

1.5.1.2.4 Hétérogénéité de l'humidité dans les serres

Contrairement à la chaleur, il n'y a pas échange d'eau entre le sol et l'air (dans le cas des cultures hors sol sous serre, où le sol est recouvert par du plastique). Cependant, les écarts de températures et les différences de maturité entre les feuilles entraînent des écarts de transpiration et donc d'humidité. En effet, la chaleur latente de transpiration atteint 180 W.m^{-2} en haut de la canopée contre 135 W.m^{-2} en bas (tomate). Ceci est également dû à un rayonnement plus faible en bas qui entraîne une transpiration plus faible. En cas de transpiration plus faible, l'humidité est également plus faible tandis que la température augmente : il y a fermeture des stomates. De plus, les parties basses de la canopées sont plus confinées, moins soumises à l'advection. Ainsi, en culture de tomate, il peut y avoir une différence de 4 g.kg^{-1} d'air sec entre le haut et le bas de la canopée (Majdoubi *et al.*, 2009) (figure 4). Les gradients horizontaux d'humidité sont relativement faibles au-dessus de la canopée. Les gradients d'humidité dépendent du brassage de l'air, de la direction des courants d'air, de l'orientation des rangs par rapport à ces courants d'air...

En pratique, les serres sont souvent partitionnées en trop peu de zones de contrôle climatique pour assurer une bonne maîtrise du climat. De plus elles ont souvent trop peu de capteurs, souvent centraux. Un unique jeu de capteur ne peut mesurer la moyenne du climat dans toute la serre et donc permettre un pilotage climatique optimal. La tendance à construire des unités de serre plus grandes et plus hautes favorise l'uniformité de la lumière puisque les ombres des éléments de structures bougent plus. De plus, cela augmente la ventilation naturelle par effet cheminée. Un autre avantage des structures hautes est qu'il y a plus d'espace au-dessus de la culture pour le brassage de l'air, ce qui permet un meilleure contrôle de l'humidité, particulièrement lorsque celle-ci est élevée (Jewett et Jarvis, 2001).

1.5.2 Effets du climat sur la plante/Interactions des végétaux avec le climat

1.5.2.1 Température de plante

Plus que la température de l'air, c'est la température du végétal qui influe sur les vitesses de réaction et l'état physiologique de la plante. La température des plantes est régie par plusieurs faits. Les deux principaux sont l'absorption/l'émission de rayonnement et la transpiration. En effet, en absorbant le rayonnement, la plante gagne en énergie, sa température augmente donc. De plus, elle émet des rayons IR qui réduisent sa température (Jewett et Jarvis 2001). En journée ensoleillée, les feuilles peuvent être plus chaudes que l'air de 2 à 3°C ; au lever du soleil, elles sont légèrement plus froides que l'air (Hatfield et Burke, 1991). Lorsque la plante transpire, de l'eau à l'état liquide passe à l'état gazeux. Ce changement d'état consomme de l'énergie et entraîne donc un refroidissement de la plante. Un troisième phénomène pouvant modifier la température des plantes correspond aux échanges radiatifs entre la canopée et les parois de la serre (il s'agit alors de rayons purement infrarouge). Par faible ensoleillement, les feuilles les plus basses sont plus chaudes que les feuilles du haut, probablement parce qu'elles transpirent moins et qu'elles participent à des échanges radiatifs avec le sol. De plus, l'écart entre la température de feuille et la température de l'air est maximal

lorsque le rayonnement est maximal (Yang *et al.*, 1990). La nuit, les parois de la serre sont froides, il y a alors des échanges avec la canopée qui devient plus froide que l'air de la serre. Il y a alors risque de condensation (Mashonjowa *et al.*, 2013). Au-delà d'une certaine température (35°C), il y a des risques de dégradation de membranes (notamment celles de thylakoïdes) et la photosynthèse est donc pénalisée (Brajeul, 2001).

Un des principaux aspects rendant la température de feuille et de fruit intéressante est leur comparaison à la température de rosée. En effet, si la température de feuille ou de fruit est inférieure à la température de rosée de l'air, il y a condensation sur ceux-ci. La présence d'eau libre sur les feuilles crée alors un milieu favorable à la germination de spores d'agents pathogènes et accroît donc des risques de développement de maladies. L'écart entre la température de plante et la température de rosée est appelé DPD (Dew Point Depression). $DPD = T_{\text{canopée}} - T_{\text{dew}}$. Certains auteurs considèrent qu'il y a de l'humidité sur les feuilles si le DPD devient inférieur à 2°C (Sentelhas *et al.*, 2008).

La température des feuilles est également influencée par leur état sanitaire. Des modifications de leur température peuvent être dues à la modification des propriétés optiques de la feuille où à la perturbation de la transpiration. Les champignons peuvent modifier la transpiration des plantes en modifiant la conductance cuticulaire et stomatique. Celle-ci peut augmenter par destruction de la cuticule, augmentation de la perméabilité membranaire et inhibition de la fermeture des stomates. Inversement, une diminution de la transpiration peut être causée par une obstruction du xylème ou des stomates ainsi que par la formation de nécrose et la défoliation. Etant donné qu'il y a une corrélation négative entre la température de feuille et la transpiration, l'infection par un champignon qui perturbe la transpiration peut entraîner un profil thermique particulier le long de la feuille. En calculant l'écart de température entre le point le plus chaud et le plus froid de la feuille (maximum temperature difference MTD), il est possible de déterminer si elle est infectée (l'infection n'étant pas homogène dans toute la feuille) (Oerke *et al.*, 2006). En effet, le MTD augmente avec le niveau d'infection.

La nuit, la température de l'air est plus froide que la journée, les fruits sont donc plus froids. Le matin, de par leur volume, les fruits se réchauffent plus lentement que l'air (c'est l'inertie thermique). En effet, le soleil réchauffe d'abord l'extérieur du fruit qui réchauffe l'intérieur par conduction. Il y a donc une période, le matin, où les fruits sont plus froids que l'air : cette période présente des risques de condensation sur fruits.

1.5.2.2 Effets de la température sur la plante

De nombreux processus physiologiques dont la photosynthèse, la croissance cellulaire, la respiration et la transpiration sont dépendants de la température. Les réactions biologiques ont un optimum thermique : leur vitesse augmente jusqu'à cet optimum puis elle diminue. Cependant, les optimums sont complexes à définir, notamment du fait qu'ils dépendent d'interactions entre les facteurs. Par exemple, la température optimale dépend du rayonnement, le rayonnement optimum dépend de la concentration en dioxyde de carbone... De plus, il y a souvent compétition entre les réactions (pour les substrats, les cofacteurs enzymatiques, l'énergie...) ou des réactions antagonistes (comme la photosynthèse et la respiration). Il existe une phase où la croissance augmente presque linéairement avec la température. Durant cette phase, la croissance est proportionnelle aux écarts positifs entre la moyenne de température et la température minimale de végétation (dans cette phase, il est possible

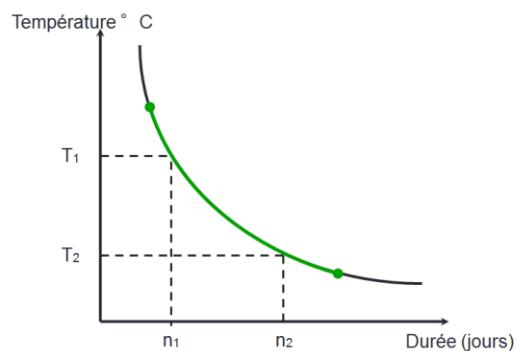


Figure 5 Schéma présentant le nombre de jours nécessaires pour passer d'un stade de développement à un autre en fonction de la température (E. Chantoiseau, cours thermique)

d'appliquer des modèles de croissance utilisant des sommes de température) (de Parceveaux et Hubert, 2007).

L'eau est le premier absorbeur d'IR dans les tissus végétaux, leur température est donc souvent corrélée à leur statut hydrique (Kümmerlen *et al.*, 1999). La température de méristème du concombre peut varier de -4,1°C à +3°C par rapport à la température de l'air. Cette température est très importante puisqu'elle est une des clés de la modulation de l'initiation foliaire (Savvides *et al.*, 2013).

1.5.2.2.1 Température de base

Chaque phase de développement a sa température de base (ou 0 végétatif : température en deçà de laquelle il n'y a pas de croissance) (Yang *et al.*, 1995). Une température moyenne de 21°C sur 24h est considérée comme optimale pour la culture de concombre (à adapter selon le rayonnement). La température de base aérienne vaut 12°C, celle des racines 16°C (Brajeul, 2001). Ces valeurs (température optimale et température de base) peuvent varier selon les auteurs. Par exemple, Perry *et al.* (1996) considèrent que la température de base du concombre vaut 15,5°C. Ils considèrent également que la température maximale est de 32°C, au-delà, la plante dépérirait. Ceci peut s'expliquer par les différences entre les variétés : toutes n'ont pas les mêmes réactions vis à vis de la température (Brajeul, 2001).

1.5.2.2.2 Croissance et développement

Afin de bien étudier les effets de la température, il convient de discerner la croissance du développement. Le développement correspond à un changement de stade (floraison, maturité du fruit, sénescence...). La croissance correspond à l'élongation des tiges, à l'extension des feuilles, à la synthèse de matière sèche... Chez la tomate, le développement est une fonction de la somme de température tandis que la croissance dépend de la température instantanée (De Koning, 1990).

Le développement est corrélé à la somme des températures. La figure 5 montre qu'à une température T_1 supérieure à T_2 , il faut moins de temps pour passer d'un stade de développement à une autre. En effet, Entre 15 et 25°C, une augmentation de la température de jour de 1°C entraîne une avance de la récolte de 1,6 jour et une augmentation de rendement de 0,54Kg.m⁻² (Grimstad et Frimanslund, 1993). De même, il faut 95 jours après le semis pour atteindre 60 feuilles à 18°C, il n'en faut que 68 à 25°C (Marcelis 1993). Lorsque la température augmente, la durée de croissance est plus courte mais le développement est plus rapide, ce qui mène à des fruits ayant une quantité de matière fraîche plus élevée (en absence de carence). Cette différence est due à l'extension des cellules, pas à leur division. Quel que soit son stade de développement, la croissance du fruit répond à la température, au sein même d'une journée. La répartition des assimilats vers les fruits augmente avec la température (au détriment des parties végétatives). Ceci est dû à l'augmentation de la force de puits des fruits. Chez le concombre, une température plus élevée permet une augmentation de la précocité mais réduit le rendement final (Liebig, 1981).

1.5.2.2.3 Echanges gazeux

La respiration augmente avec la température et induit une perte de matière sèche, une température trop élevée de nuit peut donc être préjudiciable. De jour, une respiration importante est nécessaire pour fournir l'énergie nécessaire à la fixation du carbone. Une température trop élevée peut entraîner la fermeture des stomates. Lorsque les stomates sont fermés, les échanges gazeux entre

l'air et la plante sont faibles. La respiration et la photosynthèse fonctionnent alors peu et la croissance est faible.

1.5.2.2.4 Allocation de matière sèche

Chez le concombre, le taux de matière sèche (la masse de matière sèche divisée par la masse totale) diminue de 20 à 25°C car la matière fraîche augmente mais pas la matière sèche. Il n'y a pas de différence entre 25 et 30°C. Lorsque le rayonnement est faible et que la charge en fruits est importante, lorsque la température augmente, les risques d'avortement augmentent également. Une augmentation de la température moyenne entraîne une réduction du nombre de fruits en grossissements simultanés, des feuilles plus fines, une LAI (*Leaf Area Index*) plus faible, un allongement des entrenœuds et une diminution du nombre de ramifications. La température optimale du développement des parties aériennes est supérieure à celle des racines, le milieu aérien étant plus riche en oxygène (Brajeul, 2001).

1.5.2.3 Effet de l'humidité sur les plantes

1.5.2.3.1 Stomates et transpiration

L'humidité de l'air constitue la "demande climatique" : plus l'air est sec, plus la demande climatique est forte, plus la plante transpire. Si la plante ne peut répondre à la demande climatique, elle ferme ses stomates, l'eau est alors un facteur limitant. Dans la quantité d'eau qui traverse la plante, seule une petite proportion sert à son alimentation (1/1000 selon de Parceveaux et Hubert, 2007, 1% selon Rosenberg *et al.*, 1983, c'est donc variable, notamment en fonction du climat, des espèces...). La demande climatique peut se quantifier à l'aide du déficit de pression vapeur ($DPV_{\text{air-feuille}}$) correspondant à "la différence entre la pression de vapeur saturante à la température du végétal et la pression de vapeur d'eau de l'air ambiant" (Etienne Chantoiseau, cours Bioclimatologie, BioVIGPA). Plus le DPV est élevé, plus la demande climatique est forte. L'ouverture des stomates régule l'entrée de CO_2 et la transpiration (Kaiser *et al.* 2014), elle est donc fortement déterminante dans la croissance. De plus, une diminution de la transpiration entraîne une diminution de l'auto-refroidissement des plantes. Une humidité comprise entre 55 et 75% serait favorable à la fixation du CO_2 .

En cas de forte hygrométrie, le DPV est faible, les feuilles transpirent donc peu. La transpiration est le "moteur" du flux xylémien, lorsque celui-ci est faible, l'alimentation en minéraux est faible, ce qui pénalise la croissance (Brajeul, 2001). La transpiration décroît avec l'âge des feuilles. En effet, l'ombrage de celles-ci augmente. De plus, l'activité métabolique des feuilles diminue au fur et à mesure que celles-ci vieillissent (Yang *et al.*, 1990).

Il existe des modèles permettant d'évaluer l'évapotranspiration d'un couvert végétal. Un des plus connu est l'équation de Penman-Monteith. Elle prend en compte le rayonnement, la densité et la chaleur spécifique de l'air, la tension de vapeur dans l'air et la tension de vapeur saturante, la résistance aérodynamique et la résistance du couvert végétal (fonction de la résistance stomatique, cuticulaire, de la surface foliaire...) (Djikou, 2006).

1.5.2.3.2 Impact sur la morphologie

L'humidité influe également sur la morphologie de la plante : plus elle est élevée, plus la plante a des feuilles fines et de surfaces importantes (permettant une forte transpiration et étant peu résistantes à la sécheresse). Une forte hygrométrie favorise en effet le développement végétatif (croissance en



Figure 6 Photographie des tuyaux de chauffages (Ctifl)

faveur des feuilles, nombreuses ramifications). La nuit, une forte hygrométrie peut avoir un impact positif sur la répartition des éléments *via* une augmentation de la pression racinaire (Brajeul, 2001).

1.5.2.3.3 Humectation des plantes

L'humectation des feuilles peut, en plus de favoriser la germination de spores, augmenter l'affinité des feuilles pour certains polluants atmosphériques ou modifier la pénétration de produits phytosanitaires (voir, en cas extrême entraîner leur ruissellement). L'humectation est complexe à étudier puisqu'elle varie selon la forme des feuilles, leur position, leur inclinaison et leur mouillabilité.

1.5.3 Moyens d'action sur le climat dans les serres

1.5.3.1 Chauffage

Un des avantages de la culture sous serre est de pouvoir chauffer l'air intérieur afin de favoriser le développement des végétaux. Le chauffage est généralement réalisé grâce à des circuits d'eau chaude. L'eau est chauffée par une chaudière, placée dans un réservoir d'eau chaude (« réservoir d'hydro-accumulation ») puis redirigée vers des tuyaux parcourant la serre. L'eau froide récupérée en sortie de circuit suit le trajet inverse avant d'être à nouveau chauffée par la chaudière (système en « open buffer »). En période hivernale (du 1^{er} novembre au 1^{er} avril), les producteurs ont souvent recours à la cogénération pour chauffer leur eau. La cogénération consiste à utiliser un moteur à combustion pour faire tourner une turbine permettant une production d'électricité. L'électricité est revendue à EDF et l'énergie thermique produite par le moteur est utilisée pour chauffer la serre. Un inconvénient de ce système est que la production d'électricité doit être continue, un excédent de chaleur peut donc être produit en période plus douce. Le chauffage des serres de concombre est réalisé par deux types de tuyaux : des rails (type "51") placés proches du sol et des tuyaux de végétation (type "Forcas") placés à proximité de la végétation (chauffage basse température) (Figure 6). Ces derniers permettent de chauffer directement les végétaux plutôt que l'air, ce qui engendre une économie d'énergie. Cependant, ils peuvent entraîner une augmentation localisée de la transpiration pouvant augmenter les risques de maladie. Lors de grand froid, la température d'eau peut atteindre 80-85°C dans les 51 et 60-65°C dans les Forcas. Ces deux types de tuyaux peuvent supporter des températures plus élevées mais les chaudières ne le permettent pas et cela pourrait engendrer des risques pour les plantes et le personnel. Le nombre et la position des rails influent sur les gradients de température et de pression et donc sur la convection naturelle. Un plus grand nombre de rails augmente le transfert de chaleur (Mezrhab *et al.*, 2010).

1.5.3.2 Isolation

Pour améliorer l'isolation thermique des serres la nuit, les serristes utilisent des écrans thermiques. Ces écrans sont des toiles d'isolations (contenant notamment de l'aluminium) déployées horizontalement au niveau des poutres de treillis. Ils interceptent et réfléchissent les rayonnements IR issus des plantes et du sol de la serre, ce qui diminue les pertes de chaleur. De plus, les écrans thermiques augmentent le confinement de la serre, ce qui diminue les pertes de chaleur par convection mais augmente l'hétérogénéité du climat et l'humidité. Une zone tampon de température est formée entre ces écrans et le toit de la serre. Cette zone diminue les pertes de chaleur par conduction.

1.5.3.3 Refroidissement

Lorsque le climat extérieur est chaud et ensoleillé, la température dans les serres peut être très élevée, ce qui est préjudiciable au bon développement des végétaux. Dans ce cas, il est nécessaire de l'abaisser. Pour cela, différentes techniques existent. La plus simple est l'aération : lorsque la température est trop élevée, les ouvrants de toiture s'ouvrent, l'air extérieur plus froid permet une réduction de la température intérieure. L'utilisation d'écrans d'ombrage ou le blanchiment des parois réduit la transmission de la lumière et réduit donc l'augmentation de chaleur par effet de serre. Il est également possible d'utiliser l'aspersion de toiture : de l'eau est placée sur le toit de la serre, son évaporation consomme de l'énergie, ce qui diminue la température des parois et réduit donc les transferts de chaleur par conduction. Cependant, cette technique est consommatrice d'eau et peut salir les parois et donc diminuer la transmission de la lumière. Certains producteurs utilisent des brumisateurs : de fines particules d'eau sont émises dans la serre, leur évaporation diminue la température. Le problème de cette technique est qu'elle augmente l'hygrométrie et donc les risques d'émergence de champignons pathogènes. Une technique émergente est l'utilisation de « *Cooling pad* » : de l'air traverse une couche poreuse humide, l'eau est évaporée par le courant d'air, de l'énergie est consommée et la température diminue. Cependant, cela augmente l'humidité et représente un coût important (en termes de mise en place et de consommation énergétique).

1.5.3.4 Déshumidification

Afin d'éviter les risques de condensation et de maintenir un niveau de transpiration important, les producteurs doivent souvent déshumidifier les serres. Le moyen le plus simple est la déshumidification passive : les ouvrants sont ouverts, l'air humide et chaud de la serre est évacué par convection et remplacé par de l'air extérieur plus sec. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite de chauffer l'intérieur tout en maintenant les ouvrants ouverts, ce qui engendre un « gaspillage » d'énergie et une perte de CO₂. Il existe d'autres méthodes plus complexes comme l'AVS (« *Active ventilation system* ») qui consiste en une déshumidification par admission forcée d'air extérieur. Ce type d'équipement est efficace mais constitue un investissement à l'installation et une consommation énergétique importante.

1.5.4 Pilotage du climat

1.5.4.1 Prise en compte du développement des végétaux

Une bonne gestion de la température dans la serre nécessite la prise en compte du développement à court et à long terme des végétaux. En effet, les végétaux absorbent et émettent des rayonnements, ils ont des échanges d'énergie thermique avec les composants de la serre, et en modifient donc la température. Des modèles de développement à long terme des végétaux comme les modèles de sommes de températures existent et permettent d'adapter la température et de prévoir le calendrier de production. Un modèle de somme de température consiste à faire la somme des écarts entre la température moyenne sur 24 heures et la température minimale de végétation (lorsque cet écart est positif). Cela permet de prédire des stades de développement. Cependant, ces modèles sont à prendre avec précaution car ils sont souvent inféodés à un lieu, à un cultivar et à une période donnée (de Parceveaux et Hubert, 2007)

En revanche, les modèles de développement à court terme manquent, or, des processus comme la fixation du carbone et la transpiration sont presque instantanément dépendants de la température et sont donc à prendre en compte à court terme pour une gestion optimale du climat (Van Straten *et al.*, 2000).

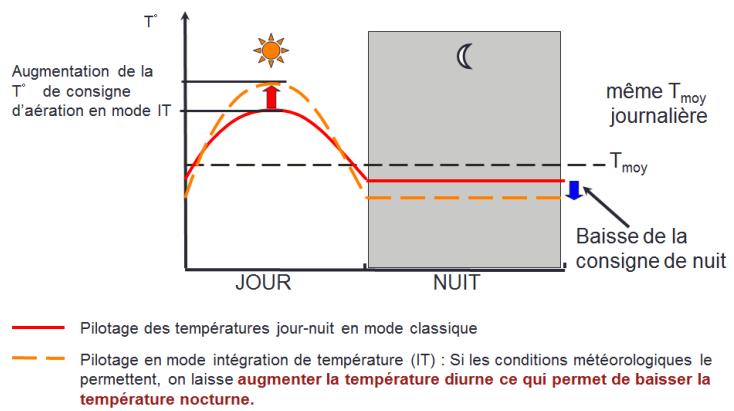


Figure 7 Schéma de la conduite de température classique et de la conduite en intégration de température (E. Chantoiseau, cours thermique)

1.5.4.2 Energie

La culture sous serre est la plus consommatrice d'énergie, tout type d'agriculture confondus. Cette forte consommation est majoritairement due au chauffage qui peut représenter jusqu'à 90% de la consommation d'énergie en serre ouverte en climat froid (Vadiee et Martin, 2012). Un dogme souvent cité est : "1°C de moins vaut 10% d'énergie en moins". Pour réduire cette consommation, de nombreux systèmes sont étudiés. Parmi eux, il existe les serres fermées et semi-fermées ainsi que la conduite en intégration de température.

La serre fermée consiste à ne pas utiliser d'aération afin de ne pas perdre de chaleur et de CO₂. Elle nécessite donc de stocker des excédents de chaleurs obtenus lors des forts ensoleillements dans des bassins ("buffer") afin de pouvoir réutiliser cette eau chauffée sans dépense d'énergie lors de moments plus froids. L'excès de chaleur estival permettrait de couvrir trois fois la demande annuelle d'une serre (Vadiee et Martin, 2012). Cependant, une serre semi-fermée paraît plus concevable, notamment en termes de gestion de l'humidité. Elle permettrait une augmentation de rendement de 20% pour une diminution de consommation énergétique de 30 à 40% (Opdam *et al.*, 2005). Un problème dû au confinement est l'augmentation des gradients de température qui peuvent entraîner des inégalités de rendement et des points chauds.

Adapter la température au rayonnement permettrait de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage de 8 à 40%, selon la saison, ceci sans pénaliser la culture puisque, à faible lumière, la plante ne peut pas "utiliser" une forte température (Aaslyng *et al.*, 2003).

1.5.4.3 Intégration de température

Le développement des végétaux est fonction de la température moyenne sur 24 heures. Ainsi, en chauffant moins la nuit et en laissant la température monter plus le jour, la température moyenne reste la même et le développement ne change donc pas. Cette conduite s'appelle l'intégration de température (figure 7) et permet de réaliser des économies d'énergie puisque chauffer la nuit consomme plus d'énergie que le jour car le jour, la lumière participe au réchauffement de la serre. Cette différence de température jour/nuit n'a pas d'effet sur le rendement ou la précocité mais permettrait une augmentation de la qualité des jeunes plants (Grimstad et Frimanslund, 1992). Un des problèmes de ce concept est que des températures trop chaudes ou trop froides peuvent provoquer un stress (notamment au niveau des membranes plasmiques et des appareils photosynthétiques). Ce stress dépend de l'intensité et de la durée d'exposition. Un découplage des processus à réponse lente (*e.g.* développement) et à réponse rapide (*e.g.* stress) est donc nécessaire. De plus, il faut appliquer une notion de "dose" d'exposition à une température stressante (Körner et Challa, 2003). L'intégration de température est généralement réalisée sur 24h, ainsi, une journée froide doit être directement compensée par une nuit chaude et *vice versa*. Une intégration sur une plus longue période permettrait des économies d'énergie supplémentaires (un mauvais jour pouvant alors être compensé par un bon) mais cela nécessite de prendre en compte les prévisions météorologiques. D'après un modèle d'intégration sur six jours, des économies d'énergie sont réalisées sur la période du printemps à l'automne. En hiver, il n'y a pas de différences voire une légère surconsommation avec l'intégration longue. Les économies augmentent avec l'amplitude thermique tolérée, mais elles ne sont pas proportionnelles (Körner et Challa, 2003). Le concombre peut endurer une température de 8°C pendant six heures si cette période est suivie d'une période à 20°C (Rietze et Wiebe, 1989).

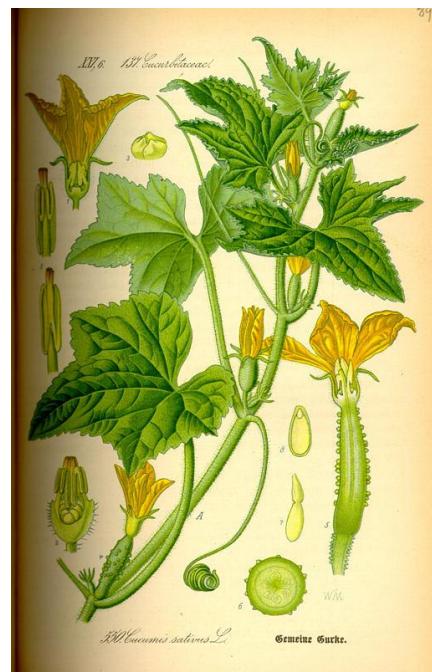


Figure 8 Dessin de *Cucumis sativus* L. (<http://www.uniprot.org/taxonomy/3659>)

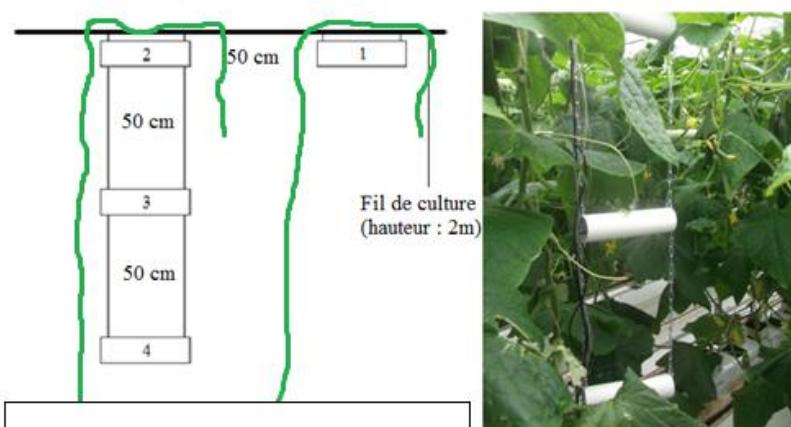


Figure 9 Schéma et photographie de la position verticale des capteurs (schéma personnel, photographie : SCEA Cheminant)



Figure 10 Schéma d'un capteur d'humidité relative et photographie de son installation (photographie : SCEA Cheminant, schéma : Vaisala, HUMICAP technology description)

Un fort écart de température entre le jour et la nuit favorise le développement génératif, tandis qu'un faible écart favorise le développement végétatif (Brajeul, 2001). Afin d'obtenir une bonne production, il est important de maintenir un bon équilibre entre les parties végétatives et génératives.

2 Matériel et méthode

2.1 Le concombre *Cucumis sativus*

Le matériel végétal étudié est le concombre *Cucumis sativus* L. (figure 8). C'est une plante rampante de la famille des Cucurbitacées, originaire de l'Himalaya. Les tiges sont herbacées, flexibles, fibreuses, anguleuses et hirsutes. Les feuilles sont grandes, pentagonales et poilues. Le système racinaire est dense et superficiel. Le développement des ramifications est précoce, ce qui permet un bon renouvellement de la charpente. Les fleurs sont unisexuées (espèce monoïque), les fleurs femelles ont un ovaire infère constitué de trois carpelles. Les concombres cultivés en culture hors sol sont, en grande majorité, des plants n'ayant que des fleurs femelles qui produisent des fruits par parthénocarpie gynoïque (sans pollinisation). Le concombre produit 1 feuille par nœud et fleurit dès le 3ème ou 4ème nœud. Les concombres sont récoltés lorsqu'ils mesurent 30 à 40cm et pèsent 400 à 600g. C'est une espèce diploïde ($2n=14$) (Brajeul, 2001).

Il convient d'éclaircir, d'effeuiller et de tailler les branches axillaires des concombres afin d'obtenir un bon équilibre végétatif/génératif et de maintenir un taux de transpiration permettant une bonne maîtrise de l'hygrométrie dans la serre. Ces opérations dépendent de la période de la culture (plus d'éclaircissement en hiver lorsque la lumière est faible, moins d'effeuillage en été pour maintenir l'hygrométrie...). Les plants sont palissés en V, c'est à dire qu'il y a deux fils de culture pour chaque gouttière et que les plants sont palissés alternativement sur l'un et l'autre des deux fils. Deux gouttières sont espacées de 1,60m. La densité est de 1,88 plants par m^2 . Une fois que la tige a atteint le fil de culture, elle longe celui-ci puis elle est étêtée afin que les ramifications axillaires se développent.

La variété cultivée à la SCEA Cheminant et au Ctifl est la variété Proloog RZ HF1®, produite par le semencier Rijk Zwaan. C'est une variété à fruits longs (Les variétés à fruits longs sont quasiment les seules disponibles sur le marché européen). Cette variété possèderait les qualités suivantes : "Résistance intermédiaire à l'oïdium (*Podosphaeria xanthii*), plante aérée, entre-nœuds courts, petites feuilles. Très bonne continuité entre production de tiges et d'axillaires. Fort potentiel de rendement, réduction des temps de travaux." (catalogue Rijk Zwaan).

2.2 Les chaînes de capteurs

Pour l'expérimentation, 4 chaînes de capteurs sont à disposition. Elles sont chacune constituées de 4 capteurs de température, 4 capteurs d'humidité relative et 4 thermocouples. Il y a donc 12 capteurs par chaîne, reliés à une centrale d'acquisition de données. Chaque trio de capteurs (température, humidité, thermocouple) est placé à une position différente : les trios 1 et 2 sont placés à 50cm l'un de l'autre sur le fil de culture, le trio 3 est à 50 cm sous le 2 et le 4 à 50cm sous le 3 (figure 9).

Les sondes de température et d'humidité relative sont des HMP110 produites par Vaisala (Vaisala, Finland) (figure 10). Elles mesurent l'humidité relative entre 0 et 100% et la température entre -40 et

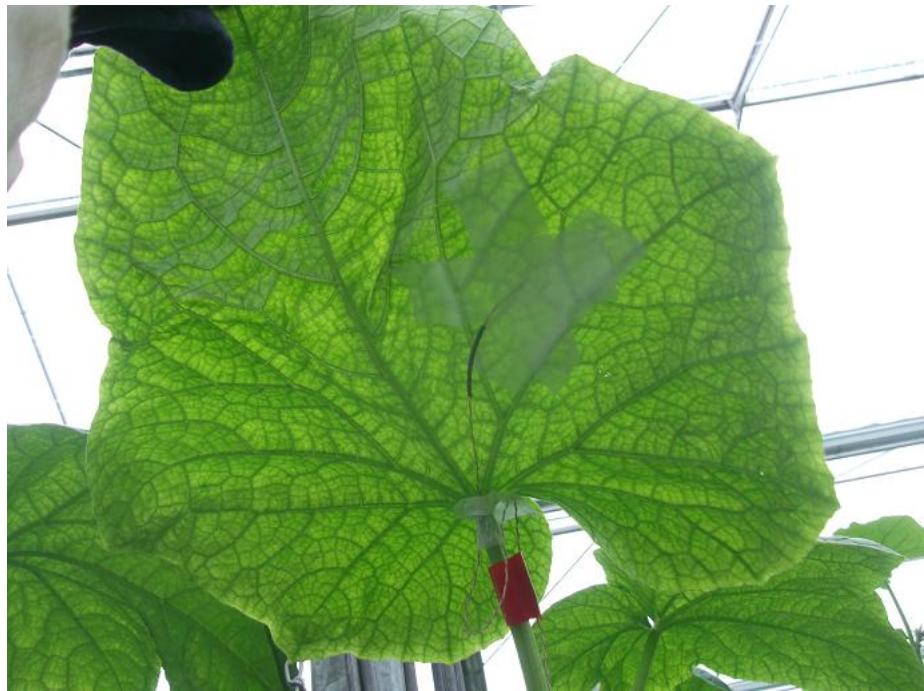


Figure 11 Photographie d'une feuille de concombre sur laquelle un thermocouple est fixé par du ruban adhésif (SCEA Cheminant)

+80°C. La sonde d'humidité a une précision de 1,1% entre 0 et 90% d'HR et de 1,8% entre 90 et 100% d'HR. La sonde de température à une précision de 0,2°C entre 0 et 40°C.

La sonde de température (Pt1000 RTD Class F0.1 IEC 60751) est un capteur à résistance de platine. La résistance du platine varie selon la température (il s'agit d'une thermistance). Un courant électrique continu est donc injecté dans la résistance, la tension aux bornes de la résistance permet de calculer la température.

Les thermocouples sont des thermocouples de type T. Ils renvoient la température du corps avec lequel ils sont en contact. Un thermocouple est constitué de deux fils de métaux différents soudés en deux points. Dans le cas des thermocouples de type T, ces deux métaux sont le cuivre et le constantan (alliage de cuivre et de nickel). Lorsque deux conducteurs de natures différentes sont mis en contact, une diffusion d'électrons a lieu. Lorsque la température augmente au niveau de ce contact, l'agitation du réseau cristallin augmente également, ce qui perturbe la diffusion des électrons (effet thermoélectrique). Cette perturbation (différence de potentiel) est proportionnelle à la température et est mesurable avec un voltmètre. Ces capteurs permettent une mesure continue de la température pour une gamme de température allant de -185°C à 200°C avec une erreur standard de ±1% (<http://aviatechno.net/thermo/thermo01.php>).

Ces capteurs ont l'avantage d'être petits et donc adaptés à la mesure de température de feuille, et d'avoir une vitesse de réponse très importante (de l'ordre du 1/100^{ème} de seconde à quelques secondes). Il seront fixés avec du scotch médical (perméable au gaz pour limiter la perturbation de la transpiration) sur la face inférieure des feuilles ou sur les fruits (figure 11).

La sonde d'humidité relative (HUMICAP 180R) est une sonde capacitive, constituée d'un film de polymère placé dans un substrat constitué de céramique (figure 10). Le film de polymère吸ue ou relâche de l'humidité en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant. La capacité électrique de ce film varie en fonction de la quantité d'eau qu'il contient. Cette variation électrique est captée par deux électrodes placées de part et d'autre du film puis convertie en taux d'HR.

Les centrales, modèle CR1000 de Campbell, sont des centrales autonomes d'acquisition et de contrôle de données. Elles acquièrent les sorties des capteurs, les numérisent, les traitent et les sauvegardent. Elles sont programmées en langage CR-BASIC sous le système d'exploitation PakBus. Les données, acquises toutes les secondes et moyennées sur 5 minutes sont ensuite collectées par ordinateur.

2.3 Protocole expérimental

2.3.1 Serre de production (SCEA Cheminant)

La SCEA Cheminant est une entreprise de production de fleurs et de légumes. Une grande partie de la production est effectuée dans des serres verre hors sol. Dans ces structures, l'entreprise produit des tomates et des concombres. Les serres ont une superficie de 1,98Ha (120 m * 165m) et sont divisées virtuellement en 4 compartiments de surfaces égales (60 m * 80 m = 4800 m²). Un couloir de 5m de large sur 120m de long traverse la serre. Dans chacun des compartiments, le climat est piloté indépendamment par un capteur. Notre étude sera réalisée dans le compartiment 9 de la serre 3.

Les serres sont de type Venlo, d'une hauteur sous chéneau de 4,5 m. Elles sont équipées d'un double réseau de chauffage au sol (type 51) et d'un tuyau de chauffage de végétation (type Forcas) placé en



Figure 12 Photographie des écrans d'ombrage (Ctifl)

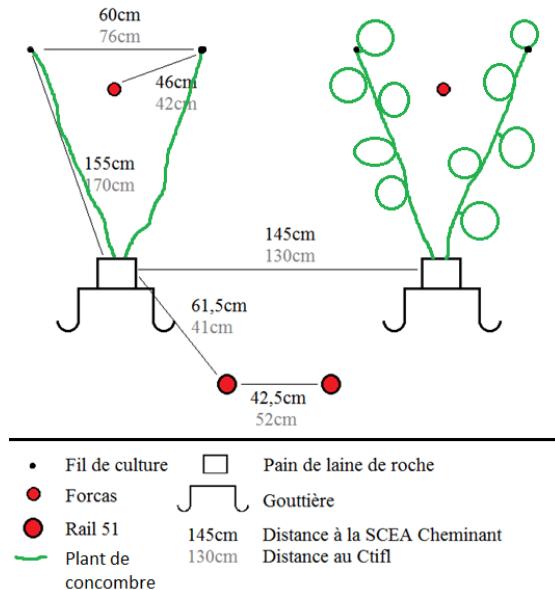


Figure 13 Schéma de la disposition des gouttières et réseaux de chauffage. Distance entre les éléments chez le producteur et au Ctifl.

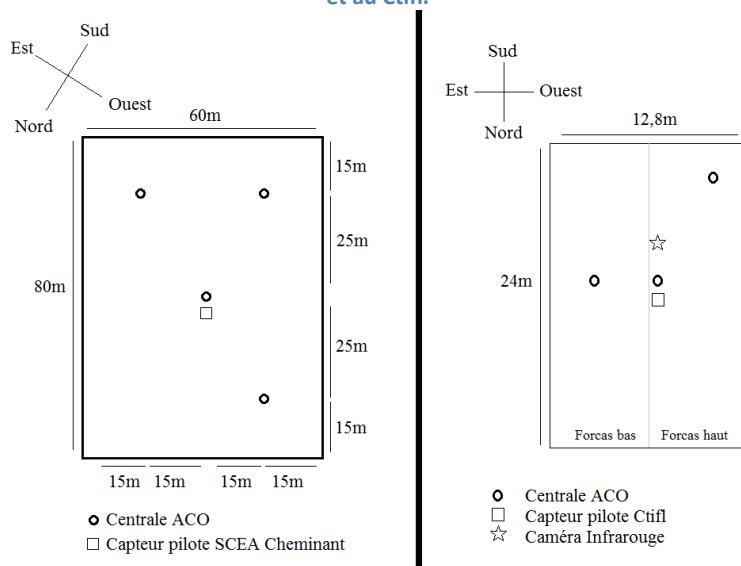


Figure 14 Schéma de la position des capteurs dans le compartiment 9 de la SCEA Cheminant (à gauche) et dans la serre 13 du Ctifl (à droite)

position haute (à 46 cm du fil de culture) dans la végétation. Elles contiennent également des brasseurs d'air et des écrans thermiques permettant d'augmenter l'isolation thermique de la serre lorsque les nuits sont fraîches. Le toit de la serre a été peint avec une peinture spéciale (Optifuse) le 5 mai afin d'éviter les brûlures des plantes provoquées par un rayonnement trop important l'été et afin d'augmenter la diffusion de la lumière. L'ordinateur climatique ainsi que les capteurs qui y sont associés sont fournis par l'entreprise PRIVA. Le capteur d'humidité est capacitif. Contrairement au Ctifl, la température dans les tuyaux de chauffage de végétation (Forcas) n'est pas pilotable par l'ordinateur climatique, elle dépend de la température de la chaudière.

2.3.2 Serre expérimentale (Ctifl)

Le Ctifl (Centre technique interprofessionnel des fruits et légume) est une structure privée réalisant des expérimentations sur les fruits et légumes. Le centre de Carquefou s'intéresse notamment aux cultures de tomates et de concombres hors sol. Il réalise des mesures physiologiques ainsi que différents essais sur les conduites climatiques, les variétés... Le Ctifl de Carquefou est équipé de 3 serres pour la culture des concombres. Chacune de ces serres a une superficie de 307,2 m² (12,8 m*24 m).

Ces serres, également de type Venlo ont une hauteur sous chéneau de 5,5 m. Le système de chauffage est constitué d'un double rail 51 ainsi que d'un simple réseau de Forcas placé soit en position haute (à 42 cm du fil de culture), soit en position basse (à 138,5 cm du fil de culture), selon les modalités expérimentales. Deux serres sur trois sont équipées de système de brassage d'air (en 2015, le Ctifl réalise des essais sur la position des Forcas et sur le brassage d'air). Le Ctifl déploie un écran thermique lorsque la température est basse la nuit. Les serres sont équipées d'écrans d'ombrage (figure 12) déployés lorsque le rayonnement extérieur est supérieur à 300W.m⁻² afin d'éviter une lumière trop importante. Le Ctifl réalise un effeuillage plus intensif des plants de concombre que le producteur. La disposition des gouttières et des tuyaux de chauffage diffère légèrement entre les deux sites (figure 13) mais la densité de plante est la même (1,88 plants.m⁻²).

2.3.3 Calendrier de mise en œuvre du protocole

Pour le stage, quatre chaînes de capteurs ont été réalisées. Dans un premier temps (du 12 mars au 29 avril), les 4 chaînes seront placées à la SCEA Cheminant afin d'y étudier le climat et son hétérogénéité (Axe 1). Une chaîne est alors placée au centre du compartiment, près du capteur pilote. Les trois autres sont positionnées dans les angles Ouest, Sud et Est du compartiment (à 15 m des parois) (figure 14). Dans un second temps (du 29 avril au 18 mai), deux chaînes seront placées au Ctifl et 2 chez le producteur afin de comparer le climat dans les deux structures (les consignes climatiques du Ctifl ayant été modifiées le 11 mai afin d'être identiques à celles du producteur). Les chaînes centrales et Est du producteur sont conservées tandis que les chaînes Sud et Ouest sont transférées au Ctifl. Elles y sont placées en position centrale et dans l'angle Sud-Ouest. Dans un troisième temps (du 20 mai au 23 juin) les 4 chaînes ont été installées au Ctifl afin de comparer les effets des différentes conduites sur le climat (Axe 3). Une chaîne est placée au centre de la modalité "Forcas haut", une au centre de la modalité "Forcas bas", une au Sud de la modalité "pas de brassage" et une au Sud de la modalité "brassage à 5 volumes de serre par heure" (figure 15). Dans un dernier temps (du 23 juin au 15 juillet), les 4 chaînes sont placées à la SCEA Cheminant dans la même disposition que du 12 mars au 29 avril afin de réitérer l'étude de l'axe 1 à une période différente, lorsque le climat est différent (figure 15).

Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
	Culture 1 Cheminant				Culture 2 Cheminant	
	4 Chaînes SCEA Cheminant		2 chaînes Cheminant		4 chaînes Cheminant	2 chaînes Cheminant
		Culture 2 Ctifl			Culture 3 Ctifl	
		2 chaines Ctifl		4 chaines Ctifl		2 chaines Ctifl

Figure 15 Calendrier des cultures dans les deux structures et des positions des capteurs

Enfin, 2 des chaînes seront à nouveau transférées au Ctifl jusqu'à fin août afin de comparer les conditions climatiques des 2 sites dans les conditions estivales mais ces résultats ne seront pas présentés dans ce rapport.

La comparaison des données avec les capteurs pilotes est réalisée tout au long de l'étude. Lors de l'axe 1, tous les thermocouples seront placés sur des feuilles. Lors de l'axe deux, une chaîne (celle au Sud de la serre du Ctifl) mesurera des températures de fruit, les trois autres des températures de feuille. Ensuite, pour chacune des chaînes, deux thermocouples seront placés sur fruit et deux sur feuille.

2.4 Méthode de traitement des données climatiques

2.4.1 Les différentes unités d'humidité

Afin d'étudier l'humidité contenue dans l'air, différentes unités existent. La plus connue est l'humidité relative (Hr). C'est également celle renvoyée par la centrale. Une autre unité qui sera utilisée est l'humidité absolue (Ha) qui correspond à la quantité d'eau réellement contenue dans l'air, exprimée en $\text{g}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}^{-1}$ d'air sec. Cette unité a l'avantage d'être indépendante de la température mais elle ne permet pas de se représenter le pouvoir évaporant de l'air, ni la proximité du point de saturation.

L'humidité absolue est obtenue grâce à la formule suivante :

$$Ha = \frac{0,622 * Psat * Hr}{Patm - (Psat * Hr)}$$

Où $Psat$ correspond à la pression de saturation de l'air en eau, exprimée en Pascal, Hr à l'humidité relative en pourcentage et $Patm$ la pression atmosphérique en Pascal (elle sera considérée comme constante et valant 1013,25 hPa).

$$Psat = e^{13,7 - 5120/T}$$

Où T est la température en Kelvin.

2.4.2 Etude des risques de condensation

Si un corps d'une température inférieure à la température de rosée d'un air humide est placé dans celui-ci, il y a condensation sur ce corps. La température de rosée est obtenue grâce à la formule suivante :

$$T_{\text{rosée}} = \sqrt[8]{Hr} * (112 + 0,9T) + 0,1T - 112$$

Où T est la température en °C et Hr l'humidité relative en centième.

Les températures de feuilles et de fruits seront donc comparées aux températures de rosée correspondantes afin de voir s'il y a des risques de condensation sur ceux-ci. La durée où la température de plante est en-deçà la température de rosée sera calculée.

2.4.3 Traitement des données

Pour toutes les données (sauf celles des thermocouples), la moyenne de jour, la moyenne de nuit et la moyenne sur 24h seront calculées. Les écarts entre les données d'intérêt ainsi que les moyennes de ces écarts seront également pris en compte et comparés aux incertitudes des capteurs.

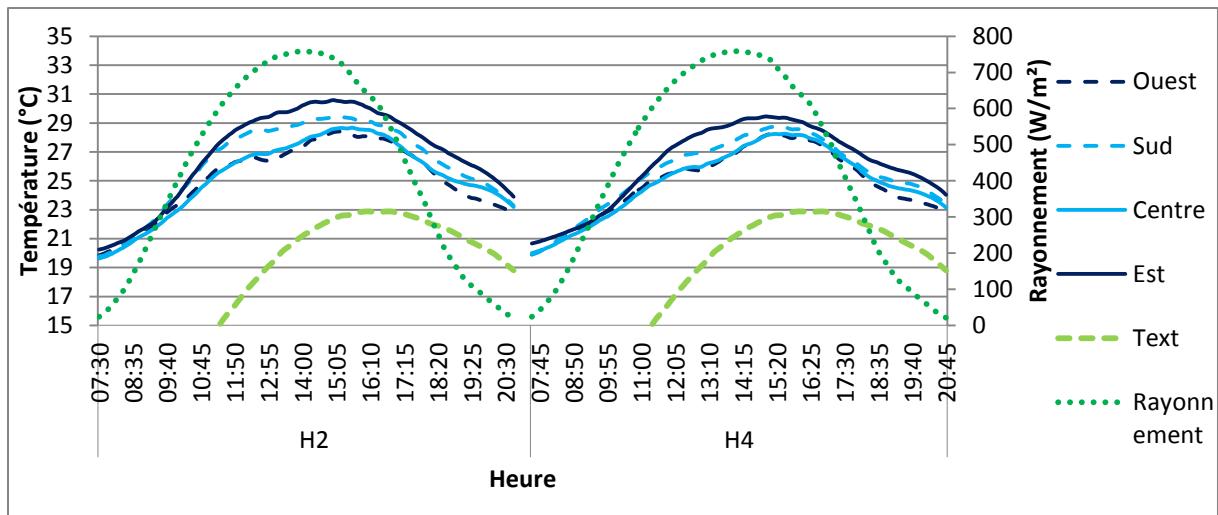


Figure 16 Répartition horizontale de la température en journée en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 9 avril (moyenne mobile 2h)

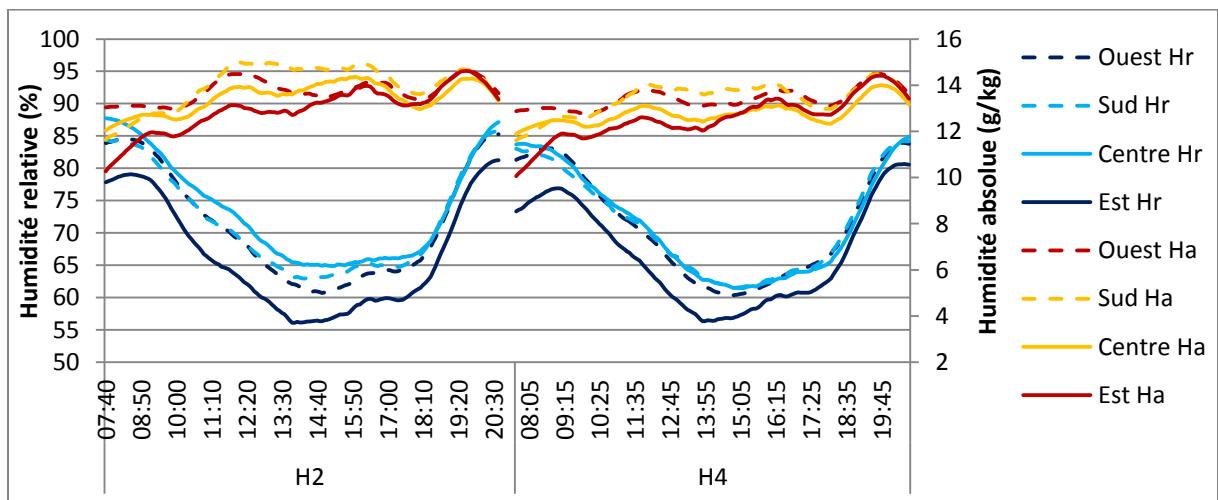


Figure 17 Répartition horizontale de l'humidité le 6 avril en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) à la SCEA Cheminant (moyenne mobile 2h)

Lorsqu'une tendance est observée, la fréquence en jour où cette tendance se produit sera comptée. Afin de mieux observer les tendances, les données seront lissées grâce à l'utilisation de la moyenne mobile (MM). Calculer une moyenne mobile consiste à calculer une moyenne avec les données de part et d'autre du temps considéré. Par exemple, pour calculer la MM 2 heures de la donnée de 15h, il faut réaliser une moyenne de toutes les données entre 14h et 16h. Ceci est réalisé pour tout t. Plus le pas de temps choisi est grand, plus le lissage est important. Pour conserver un certain niveau de détail, la MM de 2 heures sera utilisée ici.

Les données temporelles présentent deux désavantages majeurs : elles sont dépendantes entre elles et ne suivent pas une distribution Normale. En effet, la variation des données climatiques n'est pas due au hasard puisqu'elles suivent des variations cycliques quotidiennes et saisonnières. Ces caractéristiques compliquent le traitement statistique puisque les tests de base ne peuvent pas être effectués. Un test non paramétrique sera donc utilisé pour effectuer des comparaisons de moyenne : le test de Mann Whitney Wilcoxon. Ces tests seront réalisés grâce au logiciel R sur les moyennes de jour, de nuit et sur 24h. Le seuil de significativité choisi est de 5%.

Il existe une méthode plus rigoureuse pour étudier les données temporelles. Cette méthode consiste à réaliser des modèles des séries de données. Une fois ces modèles définis, il est possible d'en comparer les paramètres (bruit, tendance...). Le modèle le plus utilisé pour ces données est le modèle ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*). Ces techniques ont été investiguées mais elles constituent un traitement lourd, nécessitant une durée et une expertise non disponibles lors de ce stage.

3 Résultats

3.1 Etude du climat chez le producteur (axe 1)

3.1.1 Dans les conditions printanières (du 12 mars au 29 avril)

3.1.1.1 Hétérogénéité horizontale

En comparant les données des différents angles de la serre à celles du point central, un point se démarque : le coin Est de la serre. En effet, celui-ci présente une température et un DH plus élevés et une Hr plus faible. Cependant son Ha ne diffère presque pas de la station centrale. La figure 16 est un bon exemple de profil horizontal de température. La figure 17 est un bon exemple de répartition de l'humidité au sein de la serre de production.

Température

En haut de la canopée, la température moyenne en journée a été supérieure au point Est 100% des jours. L'écart de température entre le point Est et le point Central est supérieur à 0,4°C (soit deux fois l'incertitude des capteurs) 89% des jours. La température diurne est plus élevée de 0,77°C en moyenne au point Est. Cette différence de moyenne est significative (n=47, W=829, p-value=0,03757).

En bas de la canopée, la température moyenne du point Est en journée a également été la plus élevée 100% des jours. 94% des écarts sont supérieurs à 0,4°C et la différence moyenne vaut 0,79°C.

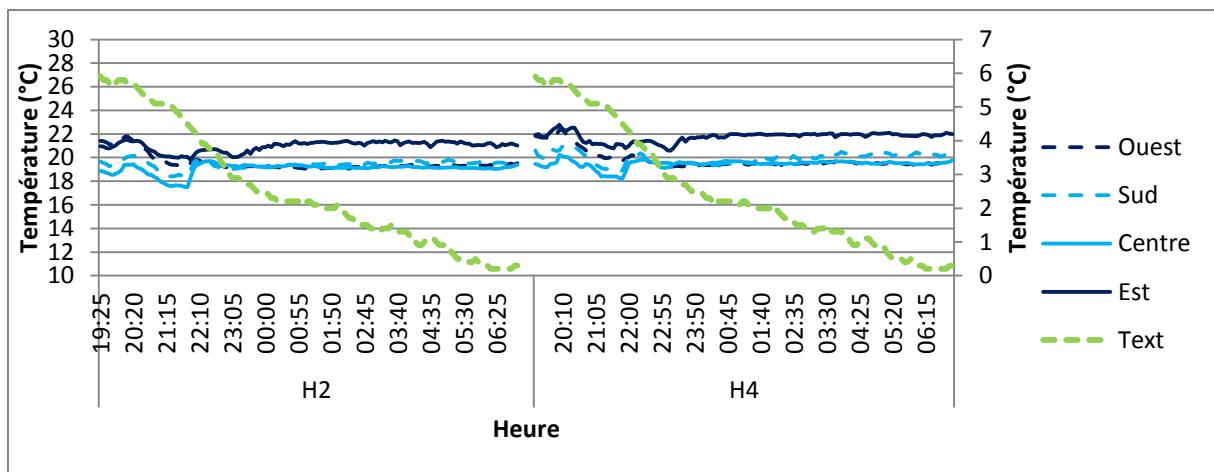


Figure 18 Répartition horizontale de la température la nuit du 24 au 25 mars en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite)

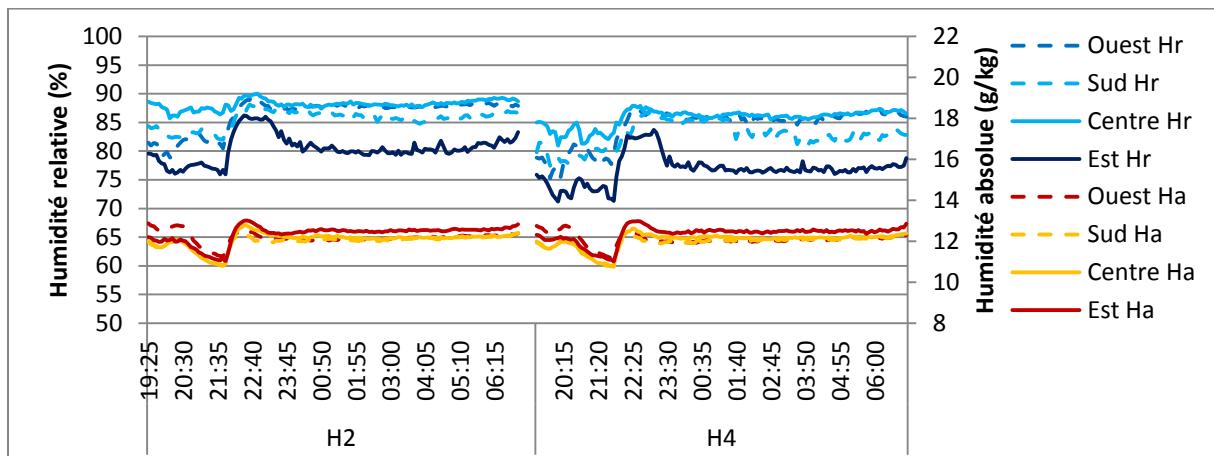


Figure 19 Répartition horizontale de l'humidité la nuit du 24 au 25 mars en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) à la SCEA Cheminant

Le test de Mann Whitney Wilcoxon révèle également une différence significative sur les moyennes ($n=47$, $W=742.5$, $p\text{-value}=0.006263$) (figure 16).

En haut de la canopée, les moyennes nocturnes sont également plus élevées au point Est dans 98% des cas. 96% de ces écarts positifs ont dépassé le seuil de $0,4^{\circ}\text{C}$. Cet écart vaut en moyenne $+0,79^{\circ}\text{C}$ pour le point Est et le test sur ces moyennes est significatif ($n=48$, $W=143.5$, $p\text{-value}=1.503\text{e}^{-13}$) (figure 18).

La nuit, en bas de la canopée, le point Est est également plus chaud dans 98% des cas. Dans 100% de ces nuits, l'écart est supérieur à $0,4^{\circ}\text{C}$. C'est la nuit, en bas de la canopée que l'écart moyen est le plus élevé avec $+0,97^{\circ}\text{C}$. Cette différence est également confirmée statistiquement ($n=48$, $W=60.5$, $p\text{-value}=1.292\text{e}^{-15}$). La nuit, les p-value sont plus faibles, les différences sont donc plus marquées que le jour (figure 18).

Hygrométrie

En haut de la canopée, la station Est a présenté une moyenne d'Hr plus faible que la station centrale 100% des journées. Cet écart a dépassé 2,2% (les Hr n'ayant pas dépassé 90%, le seuil de précision des capteurs vaut $+/- 1,1\%$) 72% des jours. En moyenne diurne, le point Est a une Hr plus faible de 3,32 points que le point Central. Cet écart est significatif ($n=47$, $W=1445.5$, $p\text{-value}=0.01003$). Concernant les humidités absolues, l'écart entre les deux stations en haut est faible ($+0,02\text{g.kg}^{-1}$ pour la station Est) et non significatif ($W=1056$, $p\text{-value}=0.7166$) (figure 17).

En bas de la canopée, cette différence d'Hr est observée 77% des jours (64% de ces écarts sont supérieurs au seuil). La différence moyenne est plus faible qu'en haut de la canopée ($-1,84\%$ pour l'Est) mais est également significative ($n=47$, $W=1380$, $p\text{-value}=0.03757$). En revanche, les différences d'Ha entre les deux stations sont plus importantes en bas de la canopée. En effet, cette différence moyenne est significative ($n=47$, $W=838$, $p\text{-value}=0.04427$) et vaut $+0,35\text{g.kg}^{-1}$ pour l'Est (figure 17).

La nuit, en haut de la canopée, 100% de Hr sont plus faibles à l'Est. 85% de ces nuits ont une différence moyenne supérieure au seuil des capteurs. Cette différence moyenne vaut $-4,54\%$ et est significative ($n=48$, $W=1905$, $p\text{-value}=3.506\text{e}^{-08}$). La nuit, les écarts d'Ha sont faibles ($-0,06\text{g.kg}^{-1}$) et non significatifs ($n=48$, $W=1144$, $p\text{-value}=0.9562$) (figure 19).

En bas de la canopée, 100% des nuits sont également plus sèches à l'Est, dont 96% de plus de 2,2%. Cet écart est le plus important ($-4,78\%$) et est confirmé par le test statistique ($W=1917$, $p\text{-value}=2.117\text{e}-08$). L'humidité absolue est semblable entre les deux stations ($+0,03\text{g.kg}^{-1}$, $n=48$, $W=1004.5$, $p\text{-value}=0.2814$) (figure 19).

3.1.1.2 Hétérogénéité verticale

Température

Les moyennes de températures de la station centrale ne sont pas significativement différentes entre les hauteurs sur 24h (entre le point le plus haut et le point le plus bas, $n=47$, $W=1026$, $p\text{-value}=0,5553$), ni en journée ($n=47$, $W=1163$, $p\text{-value}=0.6609$). Cependant, elles le sont de nuit ($n=48$, $W=320$, $p\text{-value}=1.101\text{e}-09$).

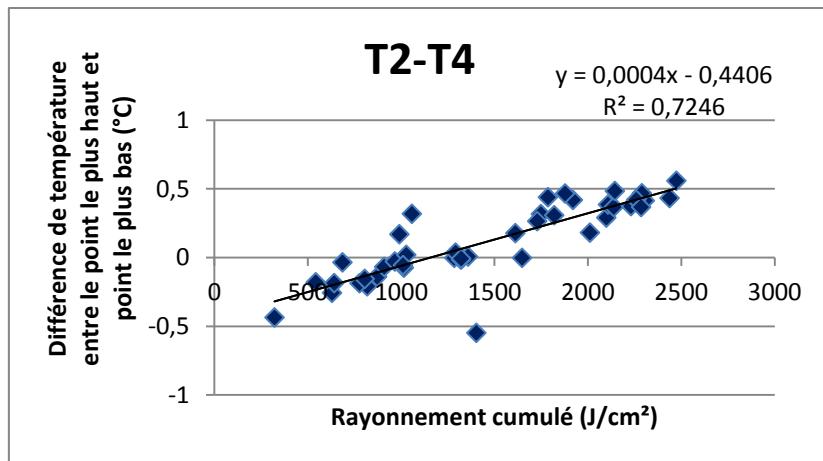


Figure 20 Evolution de l'écart de température entre le point le plus haut et le point le plus bas de la canopée en fonction du rayonnement cumulé

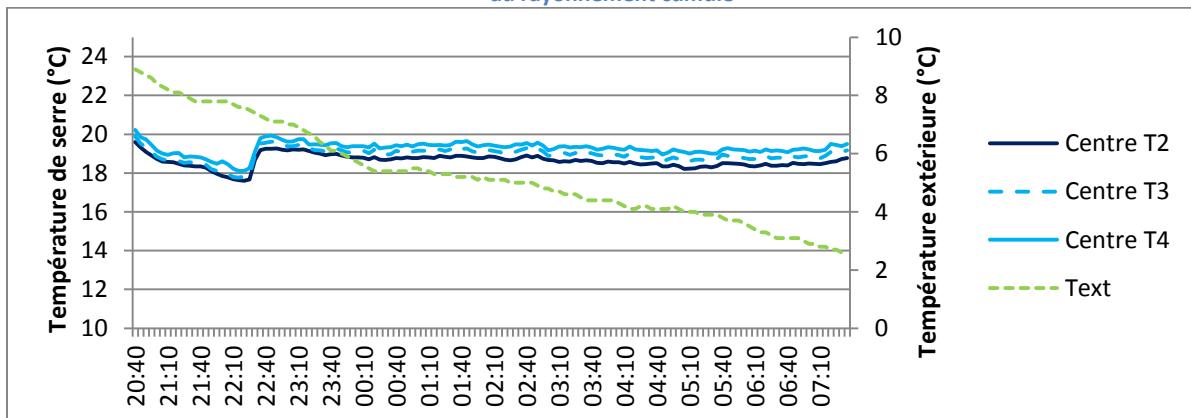


Figure 21 Répartition verticale de la température à la SCEA Cheminant la nuit du 5 au 6 avril

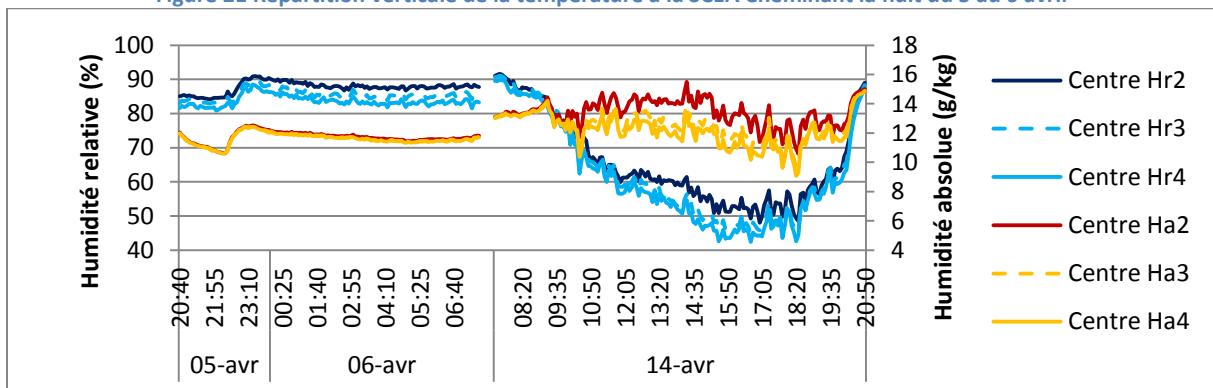


Figure 22 Répartition verticale de l'humidité la nuit du 5 au 6 avril (à gauche) et la journée du 14 avril (à droite) à la SCEA Cheminant

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des moyennes dans les différentes stations entre le 12 mars et le 29 avril

Station		Centre			Est			Sud			Ouest		
Durée		24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit
T	H2	21,31	23,17	19,07	22,10	23,94	19,85	21,71	23,63	19,38	21,71	23,47	19,56
	H4	21,42	23,05	19,43	22,30	23,85	20,40	21,81	23,50	19,76	21,74	23,31	19,82
Hr	H2	84,70	80,54	90,03	80,79	77,23	85,49	82,96	79,08	88,00	82,71	78,20	88,57
	H4	82,41	78,24	87,80	79,23	76,41	83,02	81,34	77,95	85,76	81,61	77,77	86,65
Ha	H2	13,25	14,04	12,35	13,24	14,06	12,30	13,30	14,17	12,30	13,20	13,82	12,51
	H4	12,94	13,51	12,31	13,15	13,86	12,34	13,11	13,86	12,25	13,06	13,63	12,43

Seul 1 écart de moyenne sur 24h est supérieur à 0,4°C. Cependant, en journée 55% des écarts montrent une température supérieure pour le point 2 (au niveau du fil de culture) et 40% de ces écarts sont supérieurs à 0,4°C (soit 21% des jours totaux). En traçant l'évolution de l'écart de température entre le point le plus haut et le point le plus bas de la station centrale en fonction du rayonnement cumulé (figure 20), une corrélation est observée ($r^2=0,7246$). L'équation de la courbe de tendance ($y = 0,0004x - 0,4406$) montre que, lorsque le rayonnement est supérieur à $1101,5 \text{ J.cm}^{-2}$, l'écart de température est positif (le point le plus haut est plus chaud que le point le plus bas) et, l'écart est supérieur à 0,4°C lorsque le rayonnement est supérieur à $2101,5 \text{ J.cm}^{-2}$. 100% des nuits présentent un point 4 plus chaud que le point 2. 42% de ces écarts sont supérieurs à 0,4°C.

Sur 24h, le point 2 est en moyenne plus froid que le point 4 de 0,1°C. En journée, il est en moyenne plus chaud que le point 4 de 0,11°C. La nuit, il est en moyenne plus froid de 0,37°C (figure 21).

Hygrométrie

Les moyennes d'Hr sur 24h montrent une différence entre les hauteurs 2 et 4 dans 100% des cas. 53% de ces écarts dépassent 2,2%. En effet, l'Hr est plus élevée en haut de 2,29 points en moyenne sur 24h. Cette différence est significative ($n=47$, $W=1440,5$, $p\text{-value}=0.01118$). L'Ha est également différente ($n=47$, $W=1423,5$, $p\text{-value}=0.01601$), plus élevée en haut de $0,31 \text{ g.kg}^{-1}$ en moyenne.

En journée, le haut est plus humide dans 100% des cas, mais le seuil de précision des capteurs n'est dépassé que 51% des jours. L'écart n'est pas significatif, bien que la valeur soit proche du seuil ($W=1349$, $p\text{-value}=0.06485$) et vaut +2,30 points d'Hr pour le haut de la canopée. Cependant, l'écart d'Ha entre le haut et le bas de la canopée est élevé (+ $0,53 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le haut) et est significatif ($n=47$, $W=1437$, $p\text{-value}=0.01205$) (figure 22).

La nuit, l'Hr est également plus élevée en 2 qu'en 4, et ce dans 100% des cas observés. Le seuil n'est dépassé que par 44% des moyennes nocturnes. L'écart d'Hr de +2,3 points en haut est significatif ($n=48$, $W=1730$, $p\text{-value}=2.319e-05$) mais celui d'Ha est faible (+0,04%) et non significatif ($n=48$, $W=1235,5$, $p\text{-value}=0.543$) (figure 22).

Résumé

La station Est est donc la plus chaude et la plus sèche de la serre de production, en toutes conditions. La station Centrale est la plus froide et la plus humide. Les stations Sud et Ouest ont des conditions intermédiaires entre la station Est et la station Centrale, la station Sud étant plus chaude et plus sèche en journées ensoleillées (tableau 1).

3.1.2 Dans les conditions estivales (du 24 juin au 15 juillet)

3.1.2.1 Hétérogénéité horizontale

Température

Les moyennes de températures sur 24h ne sont pas significativement différentes entre les stations dans les coins et la station centrale (en haut comme en bas). Seule une donnée s'approche du seuil de 5% : la différence entre la température de la station Est et la station centrale en haut de la canopée ($n=20$, $W=132$, $p\text{-value}=0.06786$). En comparant les moyennes de jour, aucune station ne diffère de la station centrale. Concernant les moyennes de nuit, une différence entre la station Est et

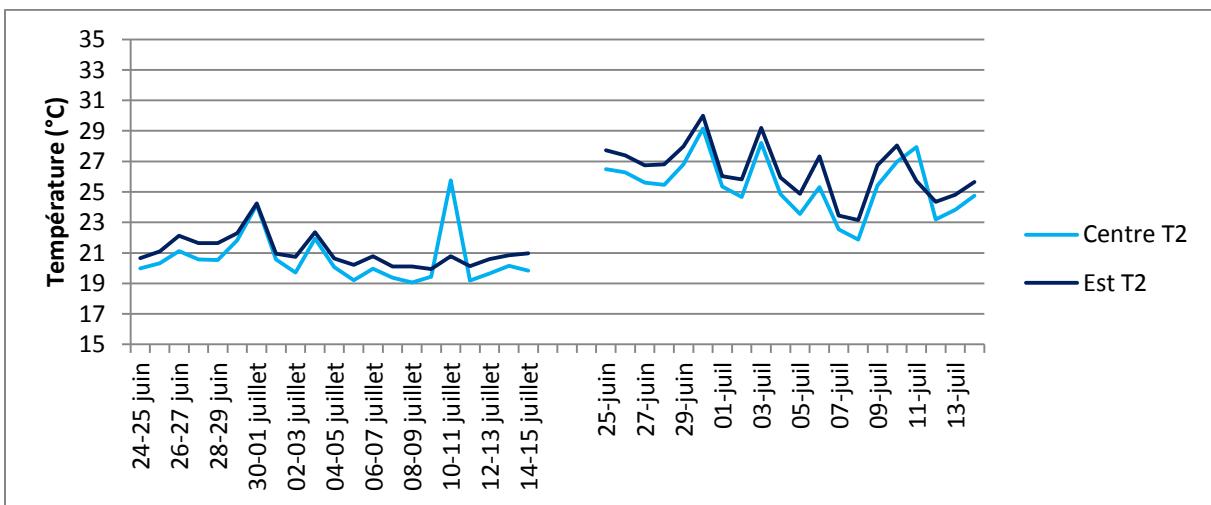


Figure 23 Moyennes de température de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des stations Est et Centrale de la SCEA Cheminant

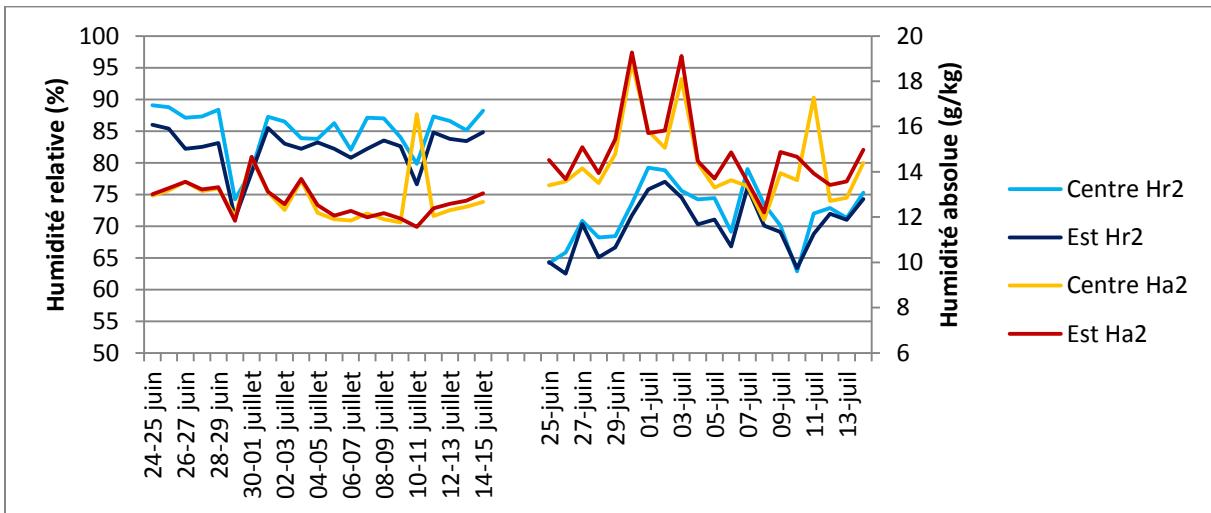


Figure 24 Moyennes d'humidité de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des stations Est et Centrale à la SCEA Cheminant

la station Centrale est observée, en haut de la canopée ($n=21$, $W=117.5$, $p\text{-value}=0.009918$) comme en bas ($n=21$, $W=108.5$, $p\text{-value}=0.005027$).

En moyenne sur 24h, en haut de la canopée, 95% des températures sont plus élevées à l'Est qu'au centre. 100% de ces écarts sont supérieurs à $0,4^{\circ}\text{C}$. En bas de la canopée, l'Est est plus chaud à 95%. 84% des écarts sont supérieurs à $0,4^{\circ}\text{C}$. En journée, en haut comme en bas, 95% des températures sont plus chaudes à l'Est (figure 23). En haut, 100% des écarts sont supérieurs à $0,4^{\circ}\text{C}$, en bas 84% le sont. De même, la nuit 95% des températures à l'Est sont plus élevées (figure 23). 95% de ces valeurs dépassent le seuil en haut, 89% en bas.

La moyenne est plus élevée à l'Est de $0,80^{\circ}\text{C}$ en moyenne sur les moyennes sur 24h en haut de la canopée et de $0,51^{\circ}\text{C}$ en bas. La moyenne de jour est plus élevée à l'Est de $0,98^{\circ}\text{C}$ en haut et de $0,53^{\circ}\text{C}$ en bas. La nuit, elle est plus élevée de $0,46^{\circ}\text{C}$ en haut et de $0,45^{\circ}\text{C}$ en bas.

Hygrométrie

Aucune différence significative n'est observée concernant les moyennes d'humidité sur 24h entre les stations des angles et la station centrale sauf pour l'humidité relative de la station Est en haut de la canopée ($n=20$, $W=280$, $p\text{-value}=0.03041$) (figure 24). La différence d'Hr en bas de la canopée n'est pas significative mais s'approche du seuil de significativité de 5% ($n=20$, $W=266.5$, $p\text{-value}=0.0742$). En journée, il n'y a aucune différence entre les moyennes d'humidité des différentes stations. De nuit, les moyennes d'Hr de la station Est sont différentes de celles de la station centrale, en haut ($n=21$, $W=349$, $p\text{-value}=0.001282$), et en bas ($n=21$, $W=336$, $p\text{-value}=0.003112$). Les Ha ne diffèrent pas.

Les moyennes d'Hr sur 24h en haut de la canopée sont plus élevées pour la station centrale que pour la station Est dans 100% des cas. 50% des écarts sont supérieurs à 2,2%. L'Ha est supérieure à l'Est dans 100% des cas en haut. En bas de la canopée, les moyennes sur 24h d'Hr sont supérieures au centre dans 90% des cas. L'écart est supérieur à 2,2% dans 28% des cas. La moyenne d'Ha à l'Est est supérieure dans 90% des cas. Le point Est est plus sec que le point central dans 90% des journées (figure 24). 50% de ces écarts sont supérieurs à l'imprécision des capteurs. L'Ha est supérieure à l'Est 100% des journées. En bas de la canopée, l'Hr est plus faible à l'Est 65% des jours. L'écart dépasse 2,2% 31% des journées. L'Ha est plus élevée à l'Est qu'au centre dans 90% des cas. La nuit, en haut de la canopée, l'Est a une Hr plus faible dans 100% des cas. L'écart est supérieur à 2,2% 67% des nuits. L'Ha est supérieure à l'Est 100% des nuits. En bas, l'Hr à l'Est est inférieure à celle du centre dans 95% des cas. L'écart est supérieur au seuil des capteurs 65% des nuits. En bas, l'Ha est supérieure à l'Est dans 95% des cas.

En moyenne sur 24h, l'Hr est plus faible en haut à l'Est de 2,24%, l'Ha est plus forte de $0,71\text{g}.\text{kg}^{-1}$. En bas, l'Est est plus sec de 1,40points d'Hr et plus humide de $0,38\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha. En journée, l'Est à -1,93 points d'Hr et $+0,83\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha en haut. En bas, il a -0,79points d'Hr et $+0,34\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha. La nuit, la différence est plus marquée avec -2,90points d'Hr et $+0,50\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha en haut. En bas, l'Est à une moyenne d'Hr plus faible de 2,63 points et une moyenne d'Ha plus élevée de $0,48\text{ g}.\text{kg}^{-1}$.

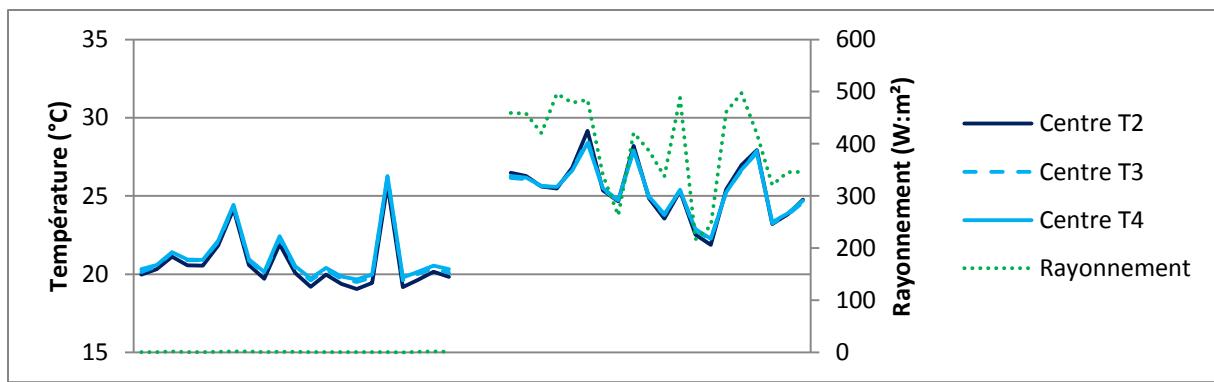


Figure 25 Moyennes de température de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des différentes hauteurs de la station centrale de la SCEA Cheminant du 24 juin au 15 juillet (chaque point correspond à 1 jour)

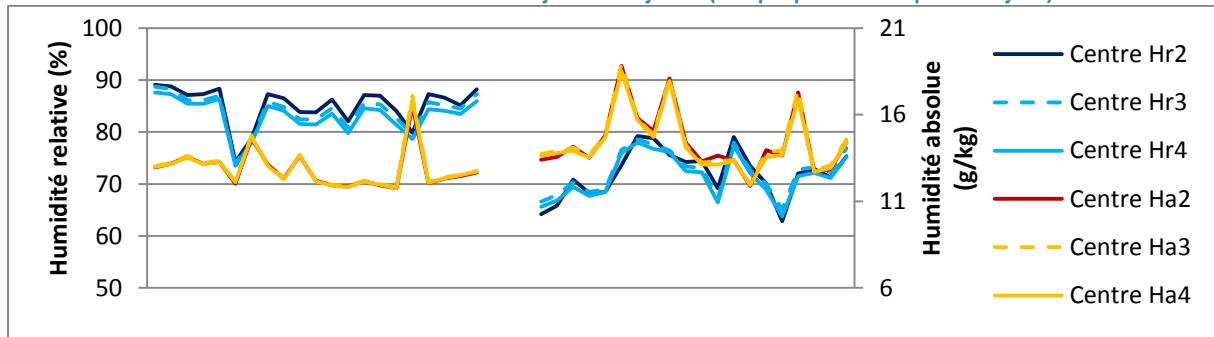


Figure 26 Moyennes d'humidité de nuit (à gauche) et de jour (à droite) des différentes hauteurs de la station centrale de la SCEA Cheminant du 24 juin au 15 juillet (chaque point correspond à 1 jour)

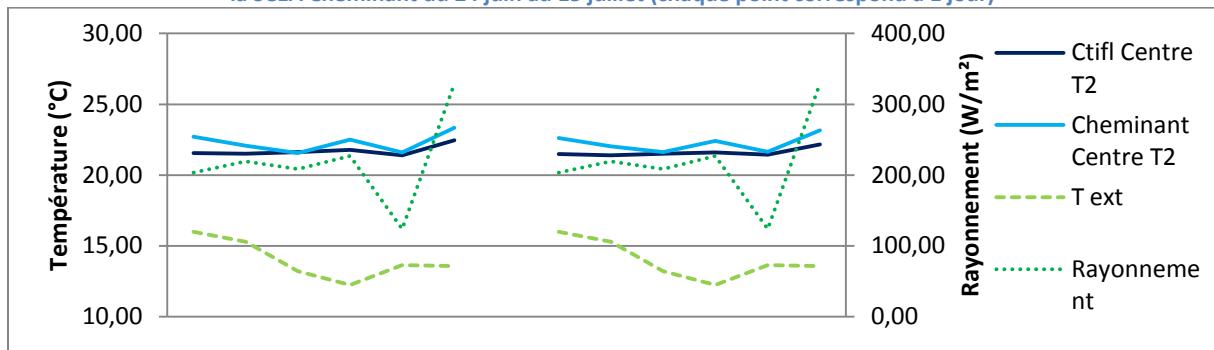


Figure 27 Comparaison des moyennes de température sur 24h au Ctifl et chez le producteur en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) du 11 au 18 mai (chaque point correspond à 1 jour)

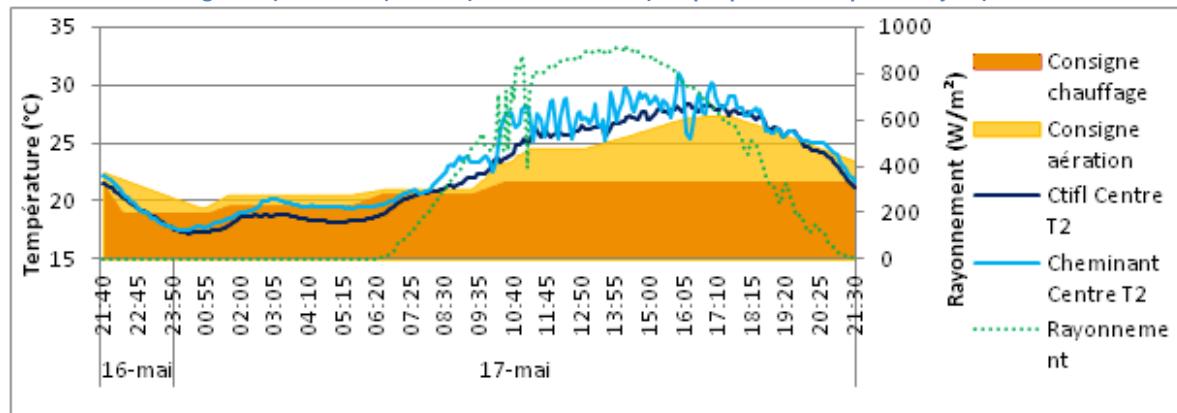


Figure 28 Comparaison des températures au Ctifl et chez le producteur. Comparaison avec les consignes de chauffage et d'aération.

3.1.2.2 Hétérogénéité verticale

Température

Le test de Mann Whitney Wilcoxon ne révèle pas de différence verticale de température au niveau de la station centrale en comparant les moyennes sur 24h. En comparant les moyennes diurnes et nocturnes, il n'y a pas de différence statistique non plus.

70% des moyennes sur 24h de température en haut de la canopée sont supérieures à celles en bas. Seule une d'entre elles l'est de plus de 0,4°C. En journée, 55% des valeurs sont plus élevées en haut. Deux écarts sont supérieurs à 0,4°C, l'un en faveur du haut plus chaud, l'autre en faveur du bas plus chaud. 100% des moyennes de température de nuit sont plus élevées en bas qu'en haut. 57% des écarts haut-bas sont supérieurs au seuil de sensibilité des capteurs (figure 25).

Sur 24h, le bas est plus chaud de 0,13°C. Sur la journée, le haut est plus chaud de 0,03°C. La nuit, le bas est plus chaud de 0,42°C.

Hygrométrie

Les moyennes d'Hr et d'Ha sur 24h ne diffèrent pas entre les différentes hauteurs de la station centrale. Les moyennes de jour ne mettent pas de différence en évidence non plus. En revanche, les moyennes d'Hr de nuit sont différentes entre la hauteur 2 (au niveau du fil de culture) et la hauteur 4 (1m plus bas) ($n=21$, $W=313$, $p\text{-value}=0.01951$).

L'Hr est plus élevée à la hauteur 2 qu'à la hauteur 4 dans 80% des moyennes sur 24h. 12,5% de ces écarts sont supérieurs à 2,2%. La hauteur 2 est plus humide que la 4 dans 70% des jours. L'écart est supérieur au seuil dans 7% des cas. La nuit, l'Hr est toujours plus élevée en haut qu'en bas (mais l'Ha est toujours plus faible). 57% des écarts d'Hr sont supérieurs à 2,2% (figure 26).

En moyenne sur 24h, l'Hr au fil de culture de la station centrale est plus élevée de 1,07 points que celle du capteur en bas de la plante. L'Ha y est plus faible de $0,13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. En journée, l'écart moyen d'Hr entre le haut et le bas est de 0,58 points d'Hr. L'écart d'Ha est de 0,00. La nuit, le haut est plus humide de 2,03 points et plus sec de $0,37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

3.2 Comparaison entre serre expérimentale et serre de production (axe 2)

Température

En haut de la canopée, la température moyenne sur 24h est plus élevée chez le producteur 5 jours sur 6. L'écart est supérieur à 0,4°C 4 jours sur 6 (figure 27). Cependant, cette différence, de +0,58°C pour le producteur n'est pas significative ($n=6$, $W=7$, $p\text{-value}=0.09307$). En bas de la canopée, la température est plus élevée chez le producteur 6 jours sur 6. Cet écart est supérieur à 0,4°C 4 jours sur 6 et est significatif ($n=6$, $W=3$, $p\text{-value}=0.01515$). Il vaut en moyenne +0,65°C.

En moyenne diurne, en haut de la canopée, la température est également plus élevée chez le producteur 5 jours sur 6. 3 de ces écarts sont supérieurs à 0,4°C. La serre du producteur est plus chaude en moyenne de 0,54°C, ce qui n'est pas significatif ($n=6$, $W=13$, $p\text{-value}=0.4848$). En bas de la canopée, en journée, les moyennes ne sont pas statistiquement différentes ($n=6$, $W=9$, $p\text{-value}=0.1797$) bien que la température soit supérieure chez le producteur 6 jours sur 6 et que 4

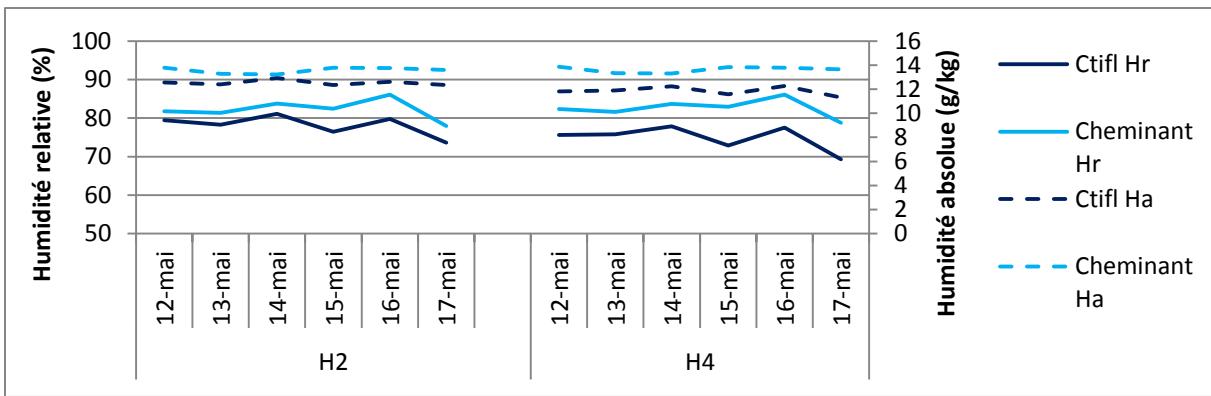


Figure 29 Comparaison des moyennes d'humidité sur 24h au Ctifl et chez le producteur en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite)

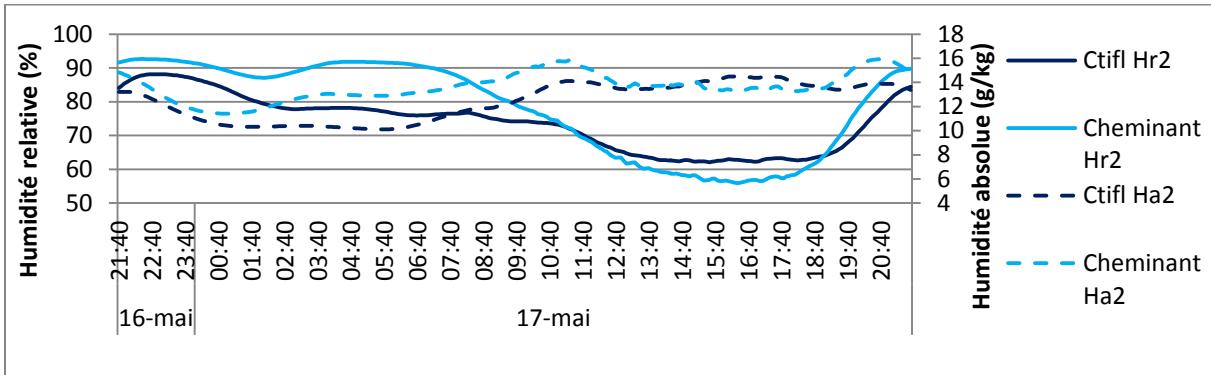


Figure 30 Comparaison des humidités au Ctifl et à la SCEA Cheminant la nuit du 16 au 17 mai et la journée du 17 mai. Les valeurs présentées sont les moyennes mobiles sur 2h.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des moyennes de température et d'humidité au Ctifl et à la SCEA Cheminant

Site		Ctifl			SCEA Cheminant		
Période		24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit
T	Hauteur 2	21,7	23,60	18,61	22,30	24,14	19,40
	Hauteur 4	21,60	23,22	18,93	22,25	23,97	19,55
Hr	Hauteur 2	78,11	74,60	83,55	82,23	76,86	90,95
	Hauteur 4	74,82	70,74	81,19	82,58	77,79	90,36
Ha	Hauteur 2	12,53	13,34	11,14	13,57	14,13	12,76
	Hauteur 4	11,85	12,32	11,04	13,62	14,19	12,79

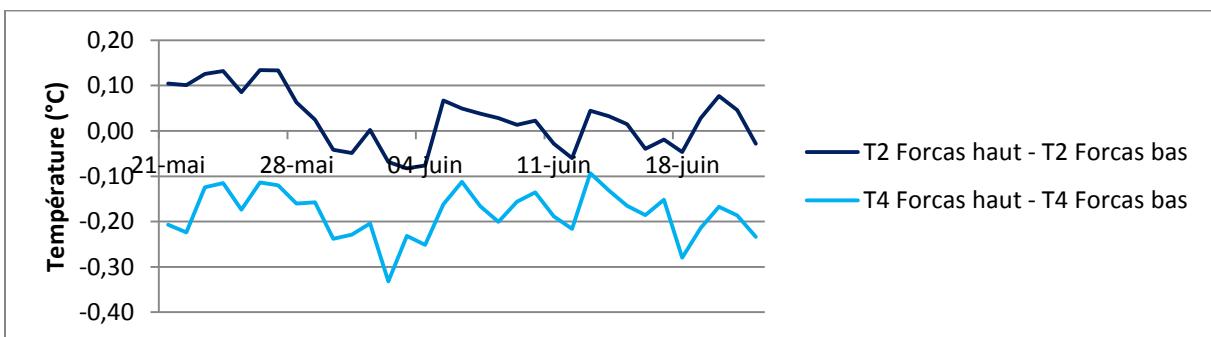


Figure 31 Ecart de température en fonction de la position du Forcas (moyenne 24h)

journées aient une moyenne plus élevée de plus de 0,4°C. L'écart moyen de température entre les deux structures vaut +0,76°C (figure28).

La nuit, la température est supérieure chez le producteur 7 fois sur 7. Seule 1 nuit (du 13 au 14 mai) présente un écart inférieur à 0,4°C en haut de la canopée. Les températures moyennes sont différentes en haut ($n=7$, $W=0$; $p\text{-value}=0.002141$) et en bas ($n=7$, $W=1$, $p\text{-value}=0.001166$). La nuit, la température moyenne est plus élevée chez le producteur de 0,80°C en haut de la canopée et de 0,62°C en bas.

En comparant les données de températures avec celles souhaitées ("consignes"), il est possible de voir que le Ctifl s'approche plus des consignes que le producteur en journée tandis que le producteur s'en approche plus la nuit (figure 28).

Hygrométrie

En haut de la canopée, les moyennes d'Hr sur 24h sont plus élevées chez le producteur 6 jours sur 6. Tous les écarts moyens sont supérieurs à 2,2% (figure 29). L'Hr est plus élevée de 4,12 points et l'Ha de 1,04 g.kg⁻¹. Les écarts d'Hr sont significatifs ($n=6$, $W=4$, $p\text{-value}=0,02597$), ainsi que ceux d'Ha ($n=6$, $W=0$, $p\text{-value}=0,002165$). En bas de la canopée, sur 24h, l'humidité est également plus élevée chez le producteur 6 fois sur 6 et tous les écarts dépassent le seuil des capteurs. Les écarts sont plus importants qu'en haut de la canopée avec +7,76 points d'Hr et +1,77g.kg⁻¹. L'écart d'Hr est significatif ($n=6$, $W=0$, $p\text{-value}=0,002165$) tout comme celui d'Ha ($n=6$, $W=0$, $p\text{-value}=0,004998$).

Les moyennes en journée en haut de la canopée révèlent également cette tendance puisque, l'humidité est plus élevée chez le producteur dans 100% des cas mais seuls 2 jours sur 6 ont une moyenne d'Hr différente de plus de 2,2%. Le producteur est plus humide de 2,26 points d'Hr en moyenne, ce qui n'est pas significatif ($n=6$, $W=11$, $p\text{-value}=0,3095$) et de 0,79g.kg⁻¹ d'Ha, ce qui est significatif ($n=6$, $W=1$, $p\text{-value}=0,004329$) (figure 30). En bas de la canopée, les jours sont plus humides chez le producteur dans 100% des cas et tous les écarts sont supérieurs aux seuils des capteurs. Les écarts sont significatifs et plus élevés qu'en haut de la canopée : +7,05% d'Hr ($n=6$, $W=3$, $p\text{-value}=0,01515$) et +1,87g.kg⁻¹ d'Ha ($n=6$, $W=0$, $p\text{-value}=0,002165$) (figure 30).

La nuit, la différence suit la même tendance et est la plus marquée. En haut comme en bas, 100% des Hr sont supérieures chez le producteur et 100% des écarts sont supérieurs à 2,2%. En haut, l'écart significatif d'Hr vaut 7,4% ($n=7$, $W=0$, $p\text{-value}=0,0005828$), celui d'Ha vaut 1,62g.kg⁻¹ ($n=7$, $W=0$, $p\text{-value}=0,002141$). En bas de la canopée, le producteur à une Hr plus élevée de 9,17points ($n=7$, $W=0$, $p\text{-value}=0,0005828$) et une Ha de +1,75g.kg⁻¹ ($n=7$, $W=0$, $p\text{-value}=0,0005828$) (figure 30).

Résumé

A consignes identiques, le Ctifl a donc une température plus faible que le producteur, de jour comme de nuit. De même, la serre du producteur a une humidité relative ainsi qu'une humidité absolue plus élevées (tableau 2).

3.3 Comparaison de deux modalités de chauffage dans les serres expérimentales (axe 3)

Température

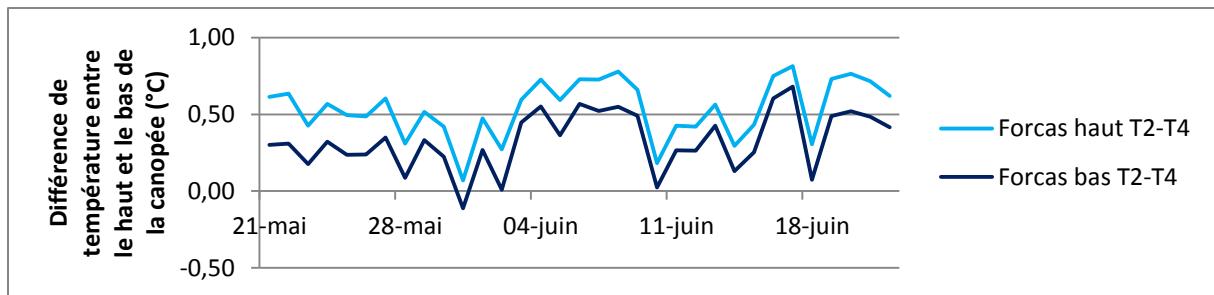


Figure 32 Différence de température entre le haut et la bas de la canopée selon la position du Forcas (moyennes 24h)

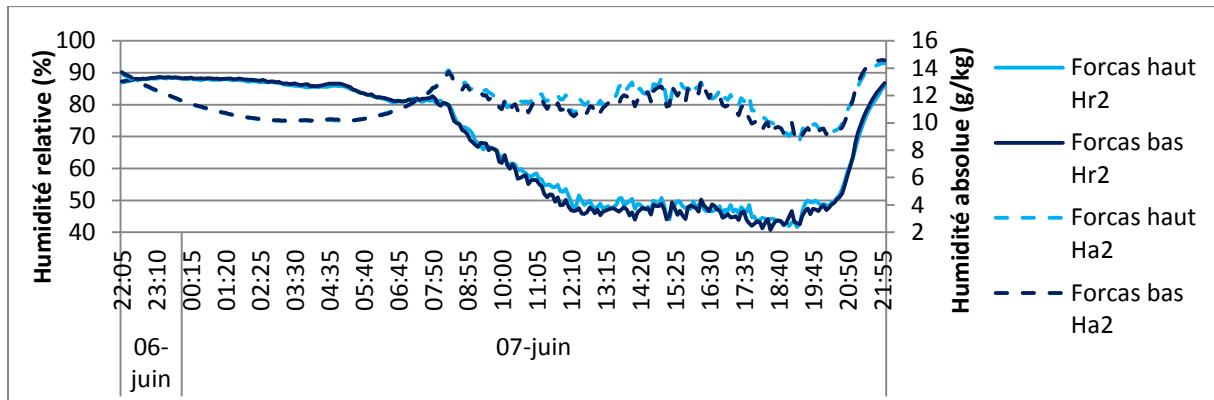


Figure 33 Comparaison de l'humidité en haut de la canopée en fonction de la position des tuyaux de chauffage de végétation

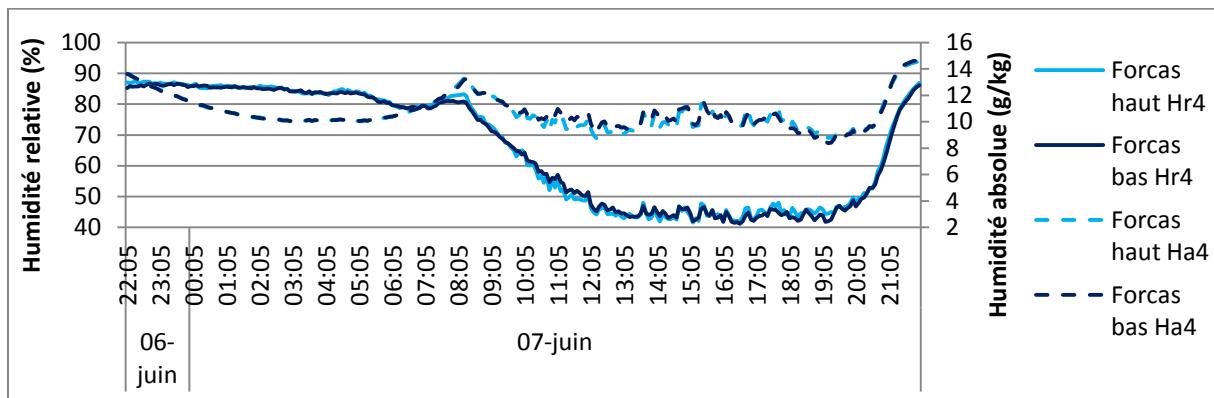


Figure 34 Comparaison de l'humidité en bas de la canopée en fonction de la position des Forcas

La figure 31 montre qu'il y a peu de différence entre les moyennes de température sur 24h entre les deux positions de Forcas. En effet, en haut de la canopée, il y a 0,02°C d'écart, en moyenne. Cet écart n'est pas significatif ($n=33$, $W=554.5$, $p\text{-value}=0.903$). De même, en bas de la canopée, la modalité « Forcas bas » est plus chaude de 0,18°C, ce qui n'est pas significatif ($n=33$, $W=462.5$, $p\text{-value}=0.2959$). Aucun de ces écarts ne dépasse 0,4°C.

L'écart sur 24h entre la température en haut et celle en bas de la canopée est plus marquée en modalité « Forcas haut » qu'en modalité « Forcas bas » (figure 32). En Forcas haut, cet écart vaut 0,54°C (le point haut étant plus chaud) et est significatif ($n=33$, $W=745$, $p\text{-value}=0.01031$). En effet, le point haut est plus chaud de plus de 0,4°C que le point bas dans 82% des cas en Forcas haut. En Forcas bas, il vaut 0,33°C, ce qui n'est pas significatif ($n=33$, $W=673$, $p\text{-value}=0.1006$). Le point haut n'est alors plus chaud que le point bas de plus de 0,4°C dans 39% des cas.

En journée, l'écart de température en haut de la canopée entre les deux modalités de chauffage est faible (0,04°C) et non significatif ($n=33$, $W=566.5$, $p\text{-value}=0.7827$). En bas de la canopée, la modalité Forcas bas est légèrement plus chaude (+0,22°C) mais cet écart n'est pas significatif ($n=33$, $W=460$, $p\text{-value}=0.2813$).

En journée, il y a des différences verticales de température, que le Forcas soit en position haute ou en position basse. En position haute, le haut est plus chaud de 0,91°C ($n=33$, $W=773$, $p\text{-value}=0.003453$). En position basse, il est plus chaud de 0,64°C ($n=33$, $W=720.5$, $p\text{-value}=0.02439$).

La nuit, la position du tuyau de chauffage de végétation n'entraîne pas de différence statistique de température : les températures moyennes en haut sont les mêmes ($n=34$, $W=574$, $p\text{-value}=0.9658$), ainsi qu'en bas ($n=34$, $W=522$, $p\text{-value}=0.496$). Les températures sont identiques en haut et en bas lorsque le Forcas est en position haute ($n=34$, $W=484.5$, $p\text{-value}=0.254$) et lorsqu'il est en position basse ($n=34$, $W=448.5$, $p\text{-value}=0.1136$).

Hygrométrie

Les moyennes sur 24h ne révèlent pas de différence d'humidité relative ni d'humidité absolue entre les différentes modalités de chauffage. La figure 33 est un bon exemple montrant cette absence de différence en haut de la canopée. En effet, en haut de la canopée, l'H_r est plus élevée de 0,31 points, ce qui est faible et non significatif ($n=33$, $W=570$, $p\text{-value}=0.7501$). L'H_a y est plus élevée de 0,08 g.kg⁻¹, ce qui est également non significatif ($W=579.5$, $p\text{-value}=0.6581$). La figure 34 montre la similarité des profils d'humidité en bas de la canopée. En effet, l'écart d'H_r entre les deux modalités vaut 0,88 points ($n=33$, $W=608$, $p\text{-value}=0.4216$) et celui d'H_a vaut 0,02 g.kg⁻¹ ($n=33$, $W=560$, $p\text{-value}=0.8474$).

Dans les deux modalités, il n'y a pas de gradient vertical d'humidité relative. En effet, en Forcas haut, l'écart non significatif ($n=33$, $W=618$, $p\text{-value}=0.3515$) entre les deux hauteurs vaut 1,03 points (le haut de la canopée étant plus humide). En Forcas bas, elle vaut 1,60 points ($n=33$, $W=645$, $p\text{-value}=0.2011$). Cependant, dans les deux modalités, il y a des différences verticales d'H_a significatives. Ce gradient est peu différent entre les deux modalités puisqu'il vaut 0,57 g.kg⁻¹ en Forcas haut ($n=33$, $W=759$, $p\text{-value}=0.006056$) et 0,51 g.kg⁻¹ en Forcas bas ($n=33$, $W=732$, $p\text{-value}=0.01647$).

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des moyennes de températures et d'humidité en fonction des modalités de chauffage

Modalité		Forcas haut			Forcas bas		
Durée		24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit
T	Hauteur 2	22,64	24,81	18,52	22,62	24,76	18,52
	Hauteur 4	22,11	23,90	18,69	22,29	24,12	18,79
Hr	Hauteur 2	76,16	69,18	89,47	75,85	68,78	89,33
	Hauteur 4	75,13	68,32	88,09	74,25	67,33	87,43
Ha	Hauteur 2	12,68	13,08	11,91	12,60	12,96	11,90
	Hauteur 4	12,11	12,23	11,86	12,08	12,21	11,84

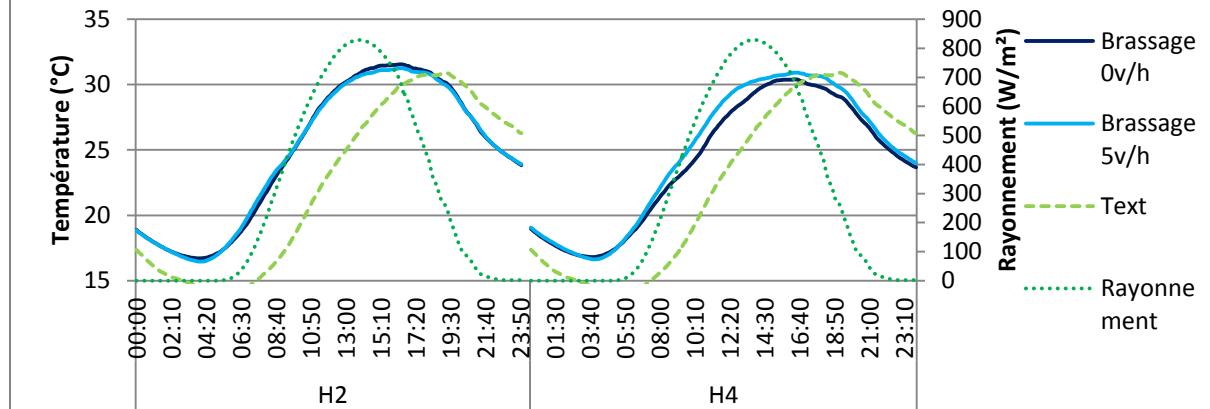


Figure 35 Comparaison de la température en présence et en absence de brassage d'air en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 4 juin (moyenne mobile 2h)

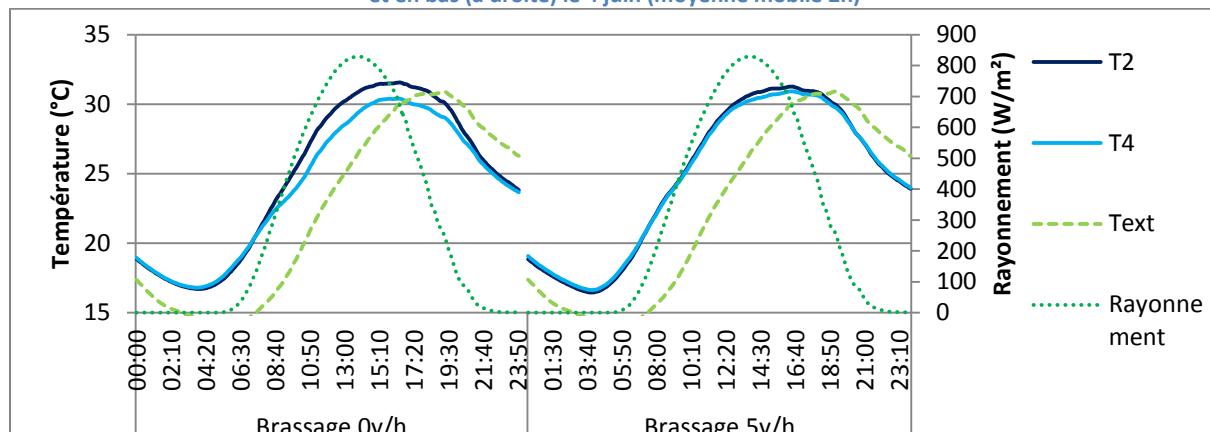


Figure 36 Comparaison des gradients verticaux de température en absence de brassage d'air (à gauche) et avec un brassage de 5 volumes de serre par heure (à droite) le 4 juin (moyenne mobile 2h)

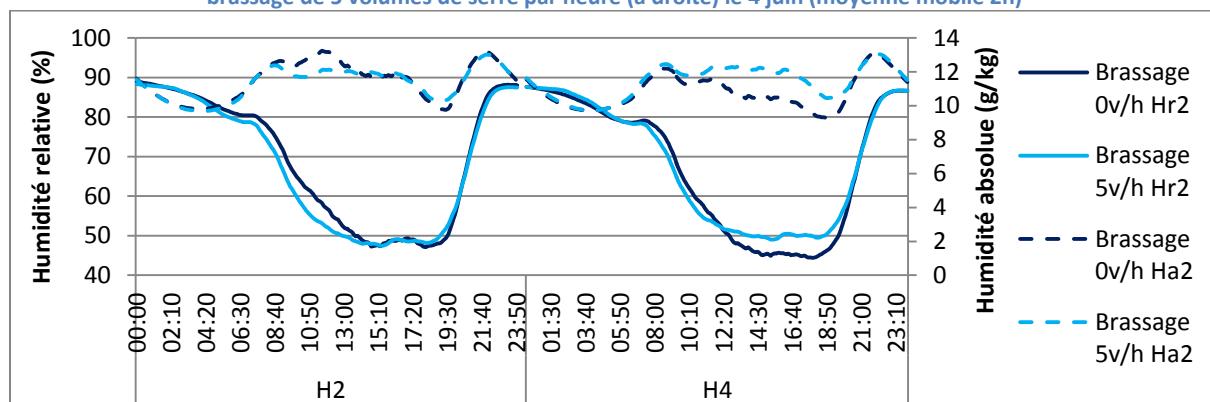


Figure 37 Comparaison des humidités en fonction du brassage d'air en haut de la canopée (à gauche) et en bas (à droite) le 27 mai (moyennes mobiles 2h)

Les moyennes diurnes présentent les mêmes résultats : il n'y a pas de différence d'Hr ni d'Ha entre les deux modalités. Dans les deux modalités, il n'y a pas de gradient vertical d'Hr mais il y en a un d'Ha.

La nuit, ces mêmes tendances se reproduisent puisque la position des Forcas n'entraîne ni différence d'Hr, ni différence d'Ha. Cependant, les résultats de gradients verticaux sont différents. En effet, en Forcas haut, la différence d'Hr de 1,38 points entre le haut et le bas n'est pas significative ($n=34$, $W=720.5$, $p\text{-value}=0.08155$), ni celle de $0,06\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha ($n=34$, $W=610$, $p\text{-value}=0.6992$). En Forcas bas, il y a une différence d'humidité relative ($n=34$, $W=776$, $p\text{-value}=0.01474$) puisque le haut est plus humide de 1,90 points. Il n'y a pas de différence d'Ha ($+0,06\text{g}.\text{kg}^{-1}$, $n=34$, $W=615.5$, $p\text{-value}=0.6499$).

Résumé

Les différentes modalités de chauffages ont donc peu de différences significatives. Cependant, la température semble plus élevée en bas de la canopée lorsque le Forcas est en position basse. De même, l'humidité relative semble plus faible en bas de la canopée lorsque le Forcas est en position basse tandis que l'humidité absolue ne varie pas d'une modalité à l'autre (tableau 3).

3.4 Comparaison de deux modalités de brassage d'air dans les serres expérimentales (axe 3)

Température

En journée, la présence de brasseurs d'air n'entraîne pas de modification de la température en haut de la canopée (figure 35). En effet, la modalité « brassage 5v/h » est plus chaude de $0,07^\circ\text{C}$ en haut de la canopée, ce qui n'est pas significatif ($n=33$, $W=523.5$, $p\text{-value}=0.7926$). En bas de la canopée, la température est supérieure avec brassage d'air dans 97% des journées étudiées. Cet écart moyen est supérieur à $0,4^\circ\text{C}$ dans 75% des cas. Cependant, cet écart de $0,52^\circ\text{C}$ en faveur des brasseurs d'air n'est pas significatif ($n=33$, $W=400$, $p\text{-value}=0.06478$), même si la p-value s'approche du seuil de significativité de 5%.

Les écarts verticaux de température en journée sont plus importants sans brassage d'air puisqu'ils valent $0,53^\circ\text{C}$ en moyenne contre $0,09^\circ\text{C}$ avec brassage (figure 36). Cependant, les statistiques ne permettent pas de mettre en évidence cette différence car aucun de ces deux écarts n'est significatif : il n'y a pas d'écart de température sans brassage ($n=33$, $W=395$, $p\text{-value}=0.05602$) ni avec brassage ($n=33$, $W=506$, $p\text{-value}=0.626$).

Les études des moyennes nocturnes et sur 24h montrent des résultats similaires : la température en bas est plus élevée en présence de brassage ; le gradient de température est moins important en présence de brassage, mais ces résultats ne sont pas significatifs.

Hygrométrie

En moyenne sur 24h, le brassage modifie peu l'humidité en haut de la canopée puisque l'écart d'Ha entre les deux modalités vaut 0,31 points et n'est pas significatif ($n=33$, $W=555.5$, $p\text{-value}=0.8929$). De même, à cette hauteur, la différence d'Ha est très faible ($0,02\text{g}.\text{kg}^{-1}$) et également non significative ($n=33$, $W=539$, $p\text{-value}=0.9489$). En bas de la canopée, l'Ha est plus élevée en présence de brassage de 1,17 point. Cet écart est supérieur à 2,2% dans 30% des cas mais il n'est pas significatif ($n=33$, $W=470.5$, $p\text{-value}=0.3459$). En revanche, le fait que l'Ha soit supérieure en bas de la

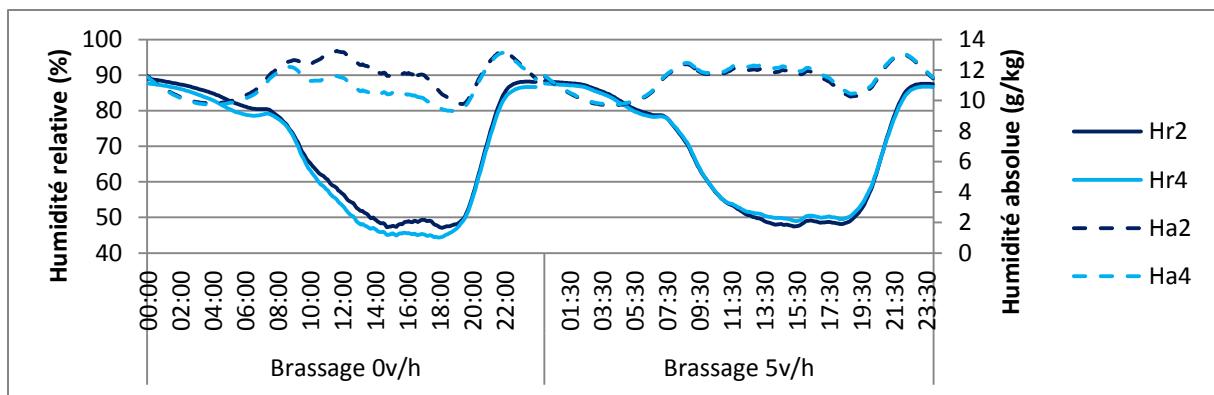


Figure 38 Comparaison des gradients verticaux d'humidité en absence de brassage d'air (à gauche) et avec un brassage de 5 volumes de serre par heure (à droite) le 27 (moyenne mobile 2h)

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des moyennes de température et d'humidité en fonction des modalités de brassage d'air

Modalité		Brassage 0v/h			Brassage 5v/h		
Durée		24h	Jour	Nuit	24h	Jour	Nuit
T	Hauteur 2	22,45	24,60	18,34	22,47	24,67	18,27
	Hauteur 4	22,13	24,07	18,43	22,48	24,59	18,46
Hr	Hauteur 2	75,36	67,71	89,95	75,05	67,36	89,71
	Hauteur 4	74,20	66,54	88,81	75,37	68,15	89,13
Ha	Hauteur 2	12,35	12,61	11,86	12,33	12,63	11,77
	Hauteur 4	11,92	12,00	11,77	12,43	12,75	11,82

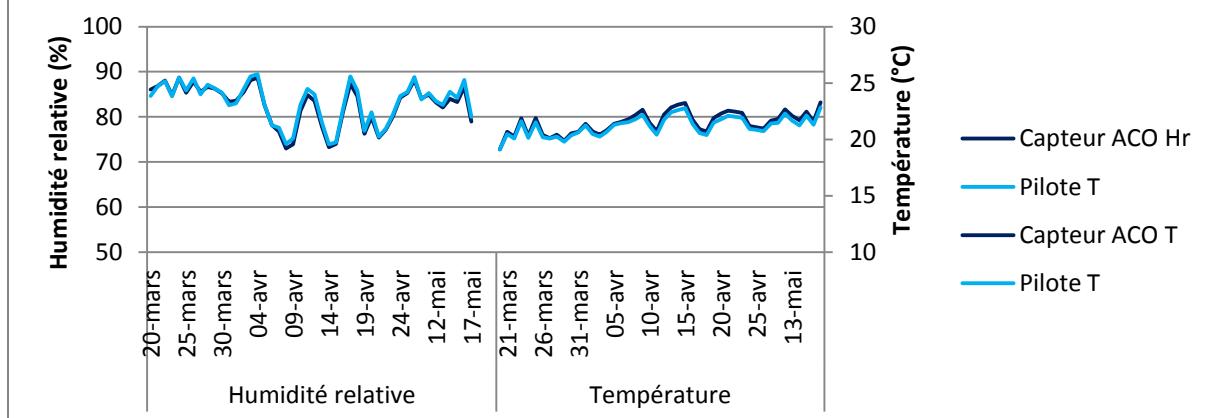


Figure 39 Comparaison des moyennes sur 24h des capteurs de la SCEA Cheminant et de ceux d'Agrocampus Ouest. À gauche les données d'humidité relative et à droite celles de température.

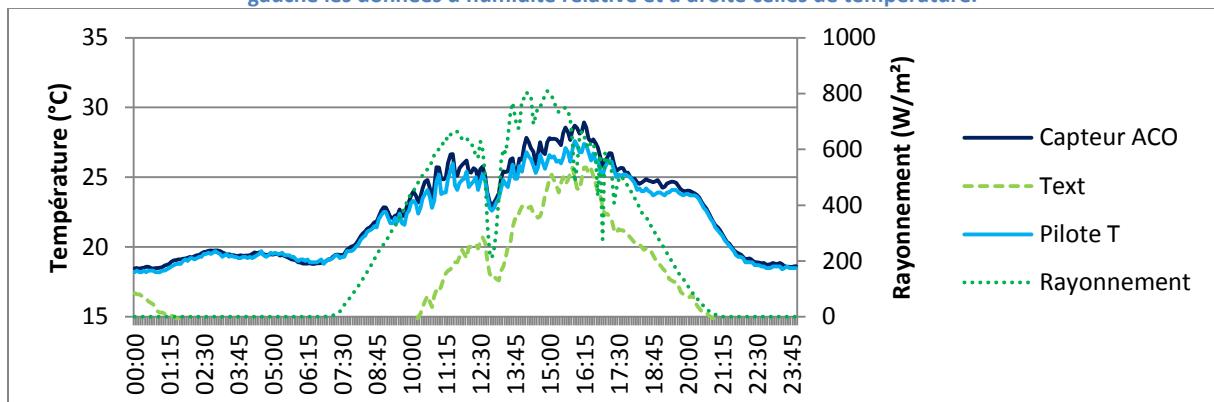


Figure 40 Comparaison entre les températures du capteur d'Agrocampus Ouest et du capteur du producteur le 23 avril.

canopée en présence de brassage dans 91% des cas est significatif ($n=33$, $W=363.5$, $p\text{-value}=0.02061$). Cet écart vaut en moyenne $+0,51\text{g}.\text{kg}^{-1}$ lorsqu'il y a du brassage d'air (figure 37).

En observant les gradients verticaux d'humidité sur 24h (figure 38), il est possible de penser que le brassage d'air a un effet d'homogénéisation. En effet, sans brassage, il y a un écart de 1,16% d'Hr entre le haut et le bas de la canopée (le haut étant plus humide). Cet écart n'est pas significatif ($n=33$, $W=475$, $p\text{-value}=0.3787$). En revanche, l'écart de $0,43\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha est bien significatif ($n=33$, $W=385.5$, $p\text{-value}=0.04208$). En présence de brasseurs d'air, ni l'écart de 0,32 points d'Hr ni celui de $0,10\text{g}.\text{kg}^{-1}$ d'Ha n'est significatif (respectivement $n=33$, $W=571.5$, $p\text{-value}=0.734$; $n=33$, $W=590.5$, $p\text{-value}=0.5595$).

Cette tendance est retrouvée en journée puisque l'humidité y est égale en haut de la canopée dans les deux conditions. En bas de la canopée, l'Hr est identique dans les deux modalités mais l'Ha est supérieure en présence de brassage ($+0,76\text{g}.\text{kg}^{-1}$). Sans brassage d'air, il n'y a pas de gradient vertical d'Hr mais il y en a un d'Ha. Avec brassage, il n'y a pas de différence verticale d'Hr ni d'Ha. La nuit, la tendance est un peu différente puisqu'aucune hétérogénéité n'est observée (Les humidités et gradients d'humidités sont les mêmes, quelle que soit le brassage d'air).

Résumé

En toutes conditions, la température en haut de la canopée ne dépend pas de la présence ou l'absence de brassage d'air. En revanche, en journée, la température en bas de la canopée est plus élevée en présence de brassage. De même, les humidités relatives et absolues sont identiques en haut de la canopée mais plus élevées en bas en présence de brassage. En présence de brassage d'air, le gradient vertical est fortement réduit. Celui d'humidité est légèrement réduit (tableau 4).

3.5 Comparaison des données avec les capteurs pilotes

3.5.1 Comparaison avec les capteurs du producteur

Température

Nos capteurs renvoient une valeur de température moyenne supérieure de $0,29^\circ\text{C}$ par rapport au capteur de température de la SCEA Cheminant. Cet écart n'est pas significatif ($n=46$, $W=1256.5$, $p\text{-value}=0.122$) (figure 39). La comparaison des moyennes de jour montre une valeur plus élevée pour nos capteurs de $0,42^\circ\text{C}$ (figure 40). Cette différence n'est pas significative ($n=46$, $W=1242.5$, $p\text{-value}=0.1508$). La nuit, cet écart ne vaut que $0,12^\circ\text{C}$ mais les séries de données sont significativement différentes ($n=48$, $W=1487$, $p\text{-value}=0,01421$).

Humidité relative

Nos capteurs donnent une valeur d'Hr inférieure de 0,50 points à celui du producteur. Cette différence n'est pas significative ($n=46$, $W=978.5$, $p\text{-value}=0.5373$) (figure 39) et est inférieure au seuil de précision de nos capteurs. Les moyennes de jours présentent également une petite différence d'Hr (0,58%), inférieure au seuil des capteurs. Cette différence n'est pas différente statistiquement ($n=46$, $W=992.5$, $p\text{-value}=0.6117$). Enfin, les moyennes de nuit de nos capteurs sont inférieures de 0,45% à celui du producteur. Cette différence n'est pas significative ($n=48$, $W=1017.5$, $p\text{-value}=0,3261$).

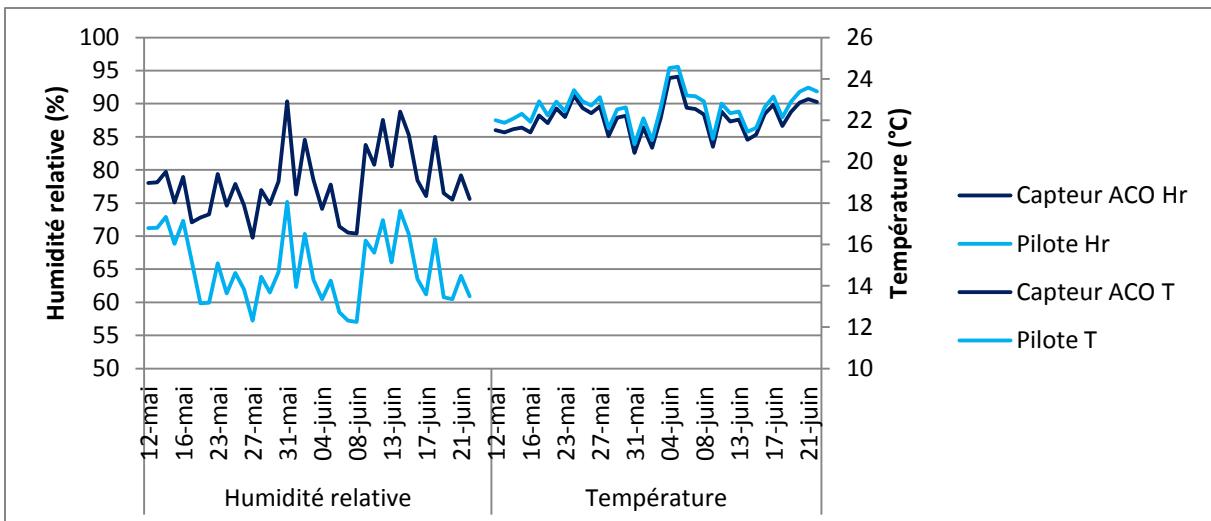


Figure 41 Comparaison des moyennes sur 24h des capteurs d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) d'Agrocampus Ouest et du Ctifl.

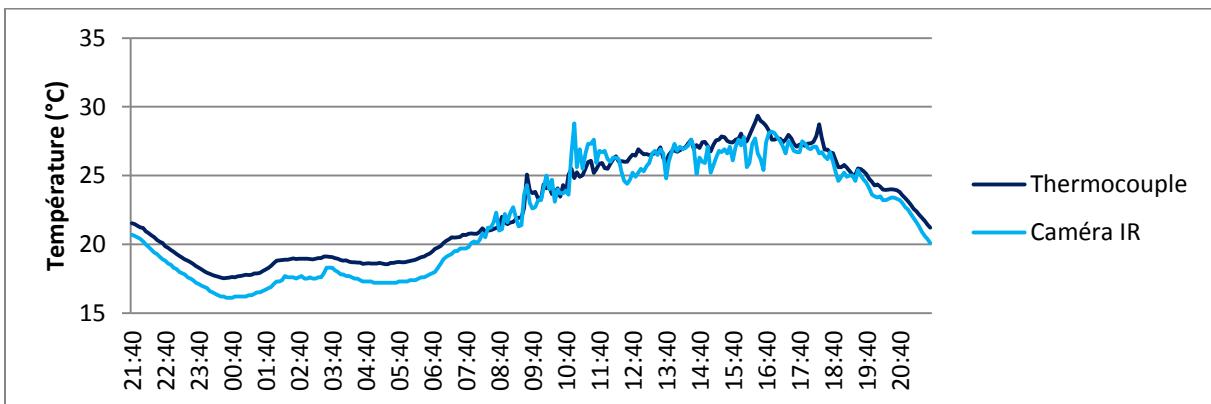


Figure 42 Comparaison des températures de feuilles obtenues avec un thermocouple ou avec une caméra infrarouge la nuit du 16 au 17 mai et la journée du 17 mai au Ctifl

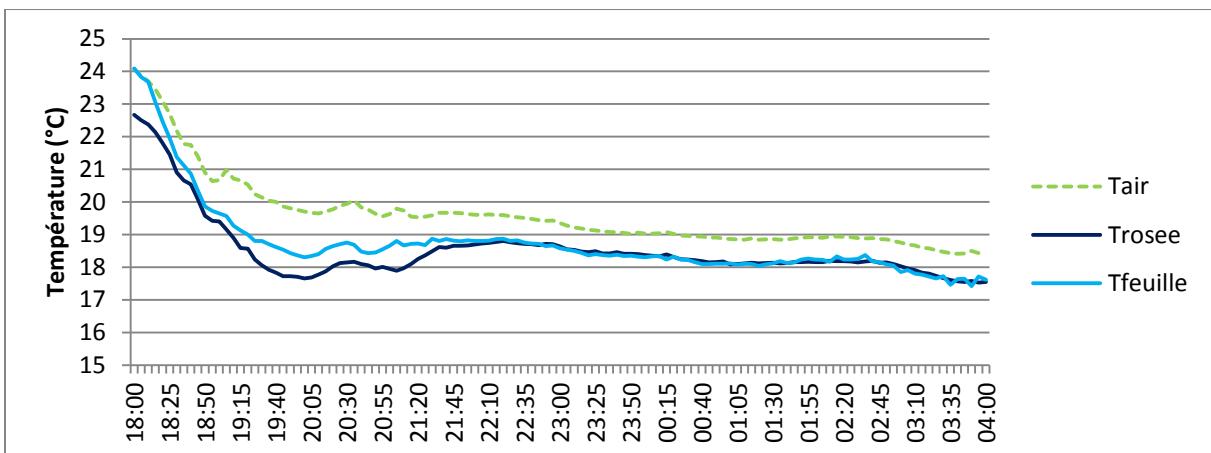


Figure 43 Comparaison de la température d'une feuille en haut de la canopée au niveau de la station Ouest avec la température au point de rosée la nuit du 12 au 13 mars.

3.5.2 Comparaison avec les capteurs du Ctifl

Température

L'écart moyen sur 24h entre la température de notre capteur et celle du capteur du Ctifl est de 0,44°C (le capteur du Ctifl donne une valeur plus élevée) (figure 41). Cet écart est significatif ($n=38$, $W=484.5$, $p\text{-value}=0.01381$). En journée, cet écart est légèrement supérieur (0,52°C) et les deux séries sont également statistiquement différentes ($n=38$, $W=527$, $p\text{-value}=0.04332$). La nuit, l'écart est plus faible (0,30°C) et n'est pas significatif ($n=39$, $W=569.5$, $p\text{-value}=0.05693$) bien que la p-value soit très proche du seuil de décision.

Humidité relative

Les moyennes d'Hr obtenus par les capteurs pilotes du Ctifl sont nettement inférieures à celles obtenus avec les capteurs d'Agrocampus Ouest. Pour les moyennes sur 24h (figure 41), la différence de 12,90 points est significative ($n=38$, $W=1401$, $p\text{-value}=1.805e-12$), ainsi que celle de jour, de 12,55 points ($n=38$, $W=1311.5$, $p\text{-value}=9.417e^{-10}$) et celle de nuit, de 13,36 points.

Caméras infrarouge

Les thermocouples fournissent des températures de feuille légèrement plus élevées que celles fournies par les caméras infrarouge. La moyenne sur 24h est en effet plus élevée de 0,59°C, sans que cette différence ne soit significative ($n=10$, $W=66.5$, $p\text{-value}=0.2261$). Celle de jour est supérieure de 0,47°C, également non significative ($n=10$, $W=63$, $p\text{-value}=0.3527$). L'écart de nuit est le plus important (0,86°C) et est significatif ($n=12$, $W=128$, $p\text{-value}=0.000656$) (figure 42).

3.6 Etude des températures de feuilles et de fruits

Du 12 mars au 29 avril

Durant cette période, seules des températures de feuilles ont été mesurées. La station Ouest a enregistré 121 données (soit 10h et 5min) où la température de feuille est inférieure à la température au point de rosée. 119 de ces enregistrements correspondent à des feuilles situées au sommet de la canopée (64 pour le point 1 et 55 pour le point 2). Concernant le point 1, le point de rosée a principalement été atteint le 12 mars entre 22h50 et 1h30 (figure 43). La feuille au niveau du point 2 a atteint le point de rosée pendant environ 1h30 la nuit du 28 au 29 avril. Les autres valeurs ne sont pas consécutives. Les feuilles de la station Sud ont atteint le point de rosée durant 21 enregistrements, soit 1h45min. Ce n'est pas toujours la même feuille qui a atteint de point de rosée et les valeurs ne sont pas consécutives. La température des feuilles de la station centrale est descendue sous la température au point de rosée 67 fois, soit 5h35. La majorité des enregistrements concerne la feuille en position 2 (en haut de la canopée) qui a majoritairement atteint le point de rosée le 4 avril entre 3h15 et 7h10. Les feuilles de la station Est ne sont descendus sous le point de rosée que 10min (feuille 2).

Du 11 au 18 mai

A cette période, aucune feuille n'a atteint la température de rosée.

Du 20 mai au 23 juin

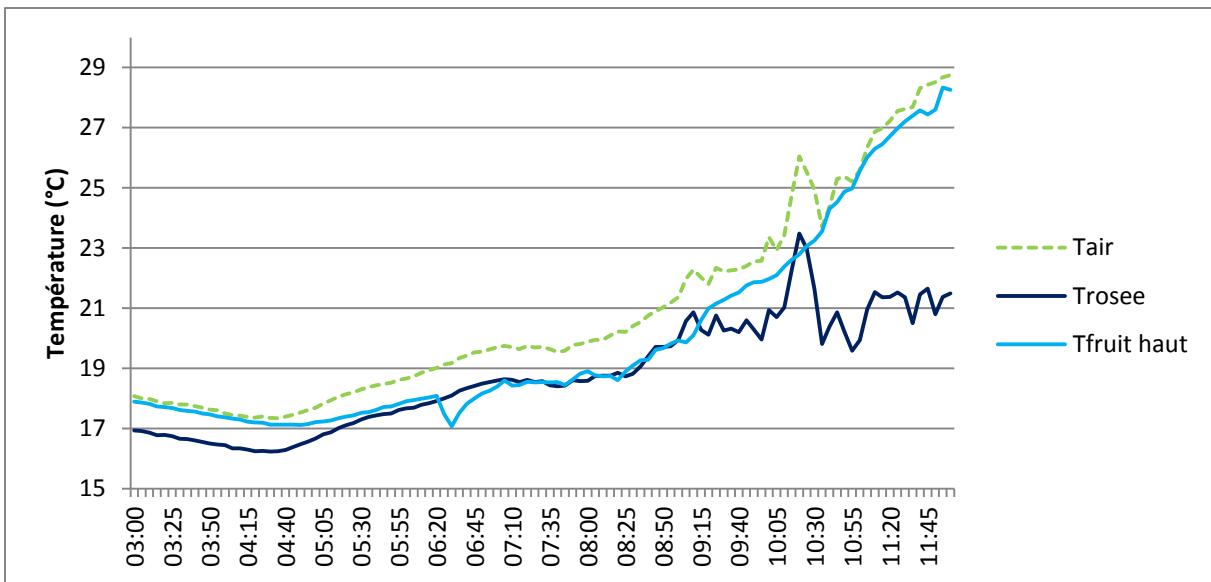


Figure 44 Comparaison de la température d'un fruit en haut de la canopée de la station centrale de la modalité Forcas haut avec la température au point de rosée le 18 juin

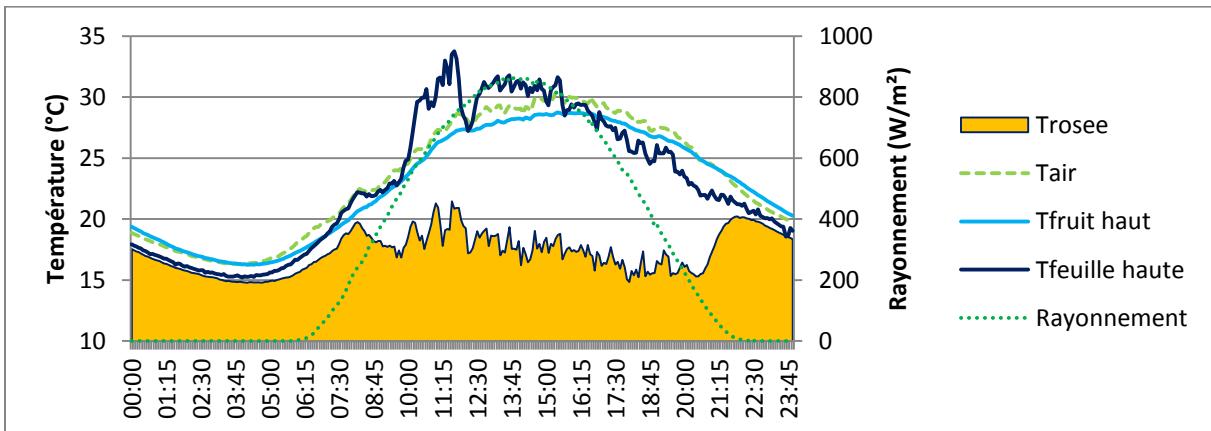


Figure 45 Température de feuille et de fruit en haut de la canopée le 17 juin

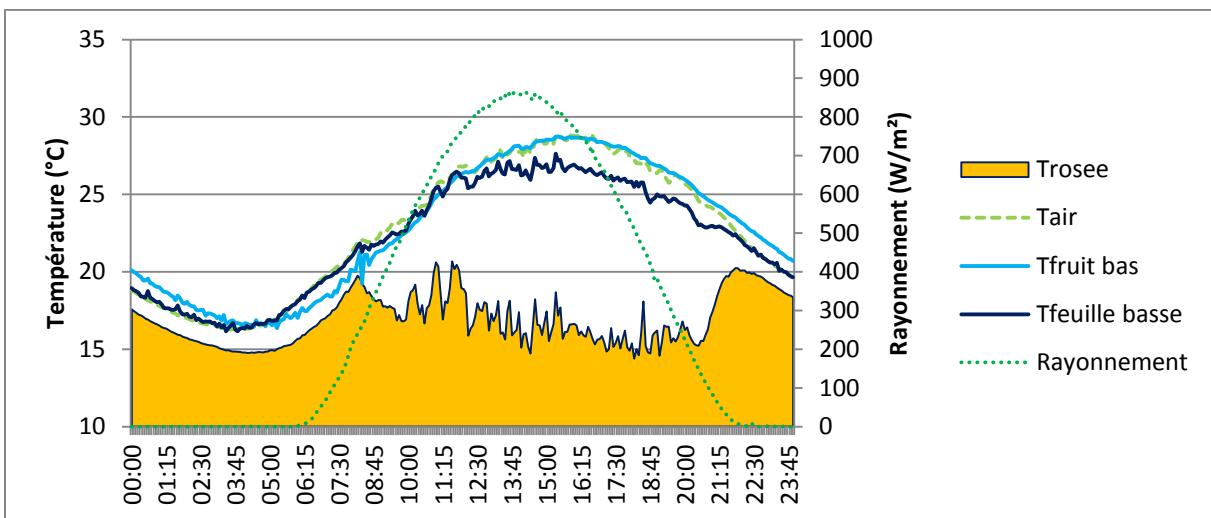


Figure 46 Température de feuille et de fruit en bas de la canopée le 17 juin

A cette période les thermocouples 1 et 3 sont placés sur des fruits et les 2 et 4 sur des feuilles à hauteur équivalente. Deux centrales sont dédiées à l'étude de l'effet de la position du tuyau de chauffage et deux à l'effet du brassage d'air.

Dans la modalité "Forcas haut", les fruits ont atteint 99 fois la température au point de rosée (8h15min) et les feuilles 11 fois (55min). Le fruit 1 (en haut) a atteint 62 fois (5h10min) la température de rosée, le 3 (en bas), 37 fois (3h05min). Les 2 fruits ont atteint le point de rosée le matin du 18 juin entre 6h00 et 9h15 (figure 44). Le fruit 1 a également dépassé cette valeur pendant une longue période le 21 juin entre 2h00 et 4h30. Dans la modalité "Forcas bas", la température au point de rosée a été dépassée 30 fois (2h30min) dont 25 fois (2h05min) pour le fruit situé en bas de la canopée. Les seules valeurs rapprochées dans le temps sont le 12 juin au matin, entre 9h et 10h.

Dans la modalité "absence de brassage d'air", la température au point de rosée a été dépassée 160 fois (13h20min), dont 94 fois pour la feuille 2 (en haut de la canopée) et 47 fois pour le fruit 3 (en bas de la canopée). Les valeurs sont regroupées entre 21h35 le 1er juin et 3h20 pour la feuille et entre 23h00 le 1er juin et 2h50 le 2 juin pour le fruit. Dans la modalité "brassage à 5 volume de serre par heure", la température de rosée a été atteinte 54 fois (4h30min) dont 34 fois pour la feuille 2, 11 fois pour le fruit 3 et 9 fois pour la feuille 4. La feuille 2 l'a atteinte une première fois le 12 juin entre 3h35 et 3h55 puis entre 23h40 le 15 juin et 5h25 le 16 juin. C'est pendant cette nuit que le fruit 3 et la feuille 4 ont également dépassé le point de rosée plusieurs fois.

Il est possible d'observer des différences de profils de température entre les feuilles et les fruits (figure 45 et 46). En effet, les fruits ont plus d'inertie thermique et se refroidissent donc plus lentement que les feuilles à la tombée du jour. De même, le matin ils se réchauffent plus lentement que l'air et que les feuilles. C'est donc à ce moment que les risques de condensation sur ceux-ci sont les plus importants.

4 Discussion

4.1 Etude du climat chez le producteur (du 12 mars au 29 avril)

4.1.1 Hétérogénéité horizontale

La station centrale est celle qui a la température la plus froide de nuit. C'est également celle qui a la température la plus proche de la température souhaitée (température de consigne). Ce qui est logique étant donné qu'elle est placée à proximité de la station climatique qui permet la gestion du compartiment. Les autres stations sont plus chaudes que celle-ci, il n'y a donc pas de risques de dégâts du froid dans l'ensemble de la serre puisque toutes les stations ont une température supérieure à la consigne (calculée pour éviter ces dégâts dus au froid). Cependant, une température plus élevée de nuit n'est pas forcément bénéfique puisqu'elle augmente la consommation énergétique et peut pénaliser le chargement des fruits en photoassimilats : lorsque la température baisse, les fruits se refroidissent plus lentement que le reste de la plante, ils sont donc plus chauds, ce qui favorise la mobilisation des sucres dans ceux-ci.

La station Est est la plus chaude et la plus sèche. Deux explications sont envisageables : la proximité de la chaudière et la proximité de la paroi. En effet, étant donnée l'étendue du réseau de chauffage, il est possible de penser que l'eau est plus froide à son extrémité qu'à la sortie de la chaudière. La



Est



Sud



Centre



Ouest

Figure 47 Photographies des plantes à la SCEA Cheminant le 25 juillet.

proximité de la paroi peut entraîner une meilleure exposition aux rayons solaires ainsi qu'un réchauffement par conduction dans la paroi de la serre si l'air est plus chaud à l'extérieur. Le fait que la station Sud soit également plus chaude que les stations Ouest et Centrale par beau temps confirme cette hypothèse (la station Sud est à la même distance de la paroi que la station Est). La station Est a également une Hr plus faible que la station Centrale mais une Ha identique. Ceci signifie que la quantité d'eau contenue dans l'air est identique mais que, au niveau de la station Est, l'air est plus loin de sa saturation en eau puisqu'il est plus chaud. Il a donc une demande évaporatoire plus importante. Une température plus élevée et une Hr plus faible correspondent à des conditions plus transpirantes pour la plante. Celles-ci sont favorables à la productivité jusqu'à un certain point où elles deviennent stressantes pour la plante et peuvent être responsables de brûlures si elles sont accompagnées d'un rayonnement important. Lors des conditions printanières aucun symptôme n'a été observé sur les plants situés près des parois. En revanche, dans les conditions estivales, plus les plantes étaient proches du bord, plus il semblait y avoir de brûlure foliaires. La figure 47 montre les pieds à proximité des différentes stations. Il ne s'agit que d'observations générales et des notations plus précises seraient nécessaires pour confirmer cette observation. Il paraît donc intéressant "d'équilibrer" le réseau de chauffage afin d'avoir des conditions plus homogènes. Cependant, ceci ne résoudrait pas le problème des brûlures en été puisqu'elles sont dues aux conditions extérieures. Peut-être un blanchiment plus intensif des parois de la serre ou la mise en place d'écrans thermiques contre celles-ci serait une solution.

4.1.2 Hétérogénéité verticale

Le fait que la température soit plus élevée en haut de la canopée lorsque le rayonnement est important est logique puisqu'il y est plus exposé, les feuilles du haut créant de l'ombre à celles du dessous. De même, le fait que le bas soit plus chaud la nuit et en jours gris est dû à la proximité des tuyaux de chauffage. De plus, les organes en haut de la canopée peuvent perdre de la chaleur par échange radiatif avec la structure. En journée, le bas de la canopée est plus sec que le haut, ceci peut s'expliquer par le fait que les feuilles transpirent moins car elles sont plus âgées et moins exposées aux rayons solaires. La nuit, l'Hr est plus faible en bas de la canopée mais l'Ha ne l'est pas, ceci est donc dû à la température plus élevée de l'air. Ces conditions paraissent optimales puisque le jour, la température est plus élevée là où le rayonnement l'est également. De même, le chargement en sucre des fruits doit être plus efficace en haut du fait de la température plus froide la nuit. Cependant, une humidité plus élevée et une température plus faible augmentent les risques de franchissement de la température au point de rosée par les organes.

4.2 Comparaison entre serre expérimentale et serre de production

En jour chaud et ensoleillé, la serre de production est plus chaude et plus sèche que la serre expérimentale. Cette différence est marquée à toutes les hauteurs mais plus en bas de la canopée qu'au niveau du fil de culture. La nuit, le climat est plus chaud et plus humide chez le producteur. Plusieurs explications sont possibles. Tout d'abord, les volumes des deux serres sont très différents. La serre de production est beaucoup plus grande, il faut donc refroidir une masse d'air beaucoup plus importante, ce qui peut être plus compliqué de par son inertie thermique. Au Ctifl les plantes sont effeuillées afin d'avoir un meilleur équilibre végétatif/génératif et d'éviter les risques de développement d'agents pathogènes sur les feuilles basses, souvent déchirées par les chariots. Le producteur ne réalise pas cette pratique culturale, couteuse en main d'œuvre. Une plante effeuillée a une LAI plus faible et transpire donc moins qu'une plante non effeuillée, ce qui pourrait expliquer une humidité supérieure chez le producteur, notamment la nuit. De même, lors de

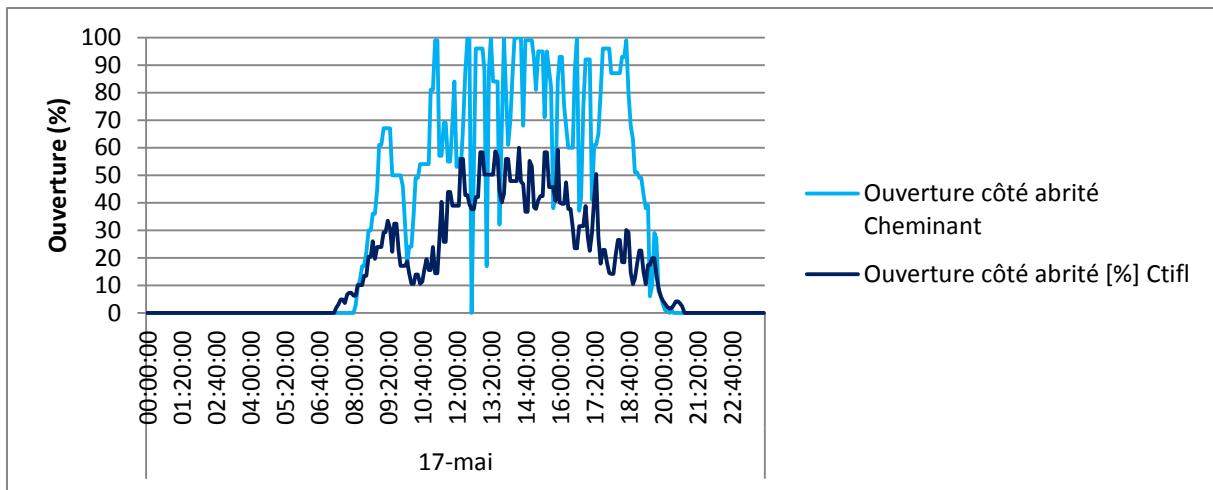


Figure 48 Comparaison de la position des ouvrants au côté à l'abris du vent entre les deux sites le 17 mai

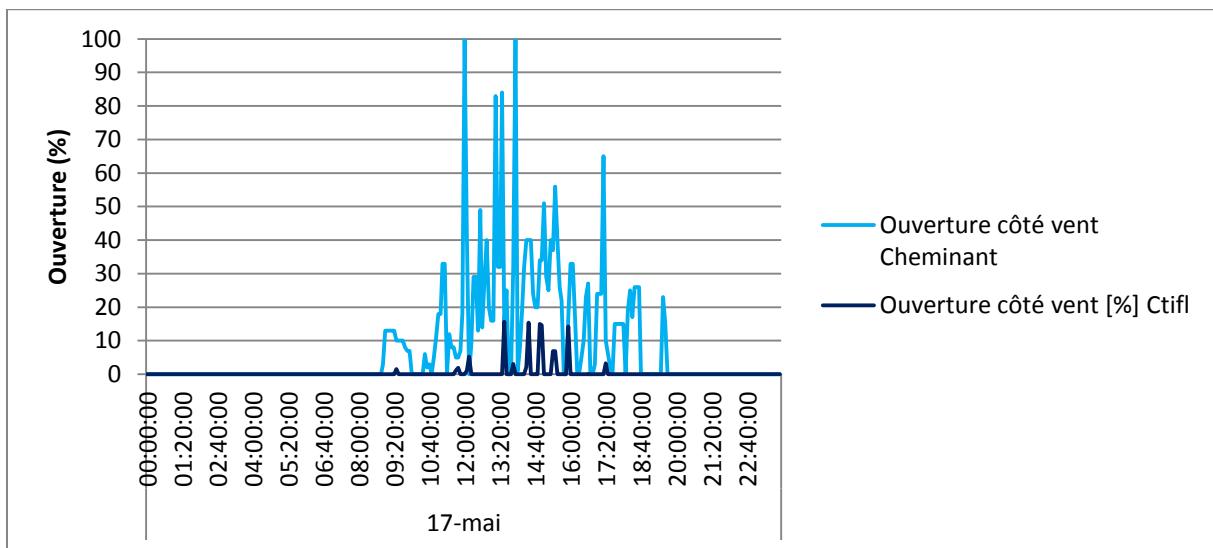


Figure 49 Comparaison de la position des ouvrants au côté exposé au vent entre les deux sites le 17 mai

l'expérimentation, les cultures n'ont pas le même âge sur les deux sites et n'ont donc pas les mêmes taux de transpiration. Les différentes configurations de tuyaux de chauffage, de fils de culture et de gouttières peuvent également modifier le climat ainsi que le taux de transpiration localisé des plantes. Chez le producteur, la température de l'eau dans les Forcas dépend de la quantité de chaleur disponible dans la chaudière, au Ctifl, elle est pilotée comme les rails 51. De ce fait, lorsque la chaudière contient beaucoup de chaleur, les Forcas sont chauds et les rails 51 doivent donc refroidir pour que la serre refroidisse. Les rails 51 étant long à refroidir, il se peut que la température reste au-dessus de la consigne. Une autre différence entre les sites pouvant expliquer la différence de température en journée est l'utilisation d'écran d'ombrage par le Ctifl et de peinture diffusante par le producteur pour lutter contre le rayonnement trop intense : il se peut que les écrans d'ombrages amoindrissent plus les rayons et permettent donc une moindre élévation de la température. De plus, la serre de production est plus basse que celle d'expérimentation, ceci peut expliquer une température plus grande la nuit.

Le fait que la température soit supérieure à la consigne chez le producteur et que l'humidité relative soit faible en journée risque d'entraîner la fermeture des stomates chez les plantes et donc une mauvaise croissance. Au-delà d'une certaine température et en deçà d'une certaine humidité, des risques plus graves comme des brûlures foliaires existent. Une humidité importante de nuit est une condition favorable au développement d'agents pathogènes. Le fait que la nuit soit humide alors que la journée ne l'est pas peut refléter le fait que la serre est confinée trop tôt : les ouvrants sont fermés tôt afin de maintenir une température élevée sans perdre de température mais les plantes transpirent encore, ce qui a pour effet de fortement augmenter l'hygrométrie. Au Ctifl, une température trop faible de nuit risque d'entraîner une moyenne sur 24h plus faible et donc de ralentir la production.

Chez le producteur, les températures sont plus proches de la consigne de chauffage de nuit (au Ctifl, la température de nuit est fréquemment inférieure à la température de consigne). En journée, c'est en serre expérimentale que la température est la plus proche de la consigne : le Ctifl aurait une meilleure gestion de jour, et le producteur une meilleure gestion de nuit ? En serre de production, la température et l'humidité varient fortement au cours d'une courte période. Les ouvrants s'ouvrent et se ferment également plus et à de plus fortes amplitudes (figure 48 et 49). Les écarts brusques de température et d'humidité sont préjudiciables à la production puisque beaucoup de processus physiologiques (*e.g.* les mouvements stomatiques) répondent rapidement aux changements de l'environnement. Le climat de la serre de production peut donc être plus complexe à gérer (stabiliser). De plus, il est possible de penser que la gestion de l'ouverture et de la fermeture des ouvrants n'est pas gérée de la façon la plus optimale par le producteur.

Il y a donc des différences réelles entre les conditions climatiques rencontrées chez le producteur et à la station d'expérimentation. Ces différences peuvent avoir des conséquences sur la transposition des résultats de la recherche à la production. Par exemple, si le Ctifl fait des expérimentations sur des techniques de déshumidification, il risque d'y voir peu d'intérêt puisque les conditions sont déjà sèches dans ses locaux. De même, des champignons risquent de moins bien se développer au Ctifl tandis que des insectes, ayant un développement optimal en conditions sèches, risquent de s'y développer plus vite. Des tests sur la gestion des maladies et des ravageurs peuvent donc fournir des résultats différents que ce qui a lieu chez les producteurs. Cependant, les écarts ne sont pas très importants et les autres conditions (équipements, prophylaxie, irrigation, fertilisation...) sont très

proximes de celles des producteurs. Les résultats des expérimentations restent donc utiles et enrichissants pour les producteurs. De plus, ces observations, une fois connues peuvent être prises en considérations lors de l'exploitation des résultats des expérimentations.

4.3 Comparaison de deux modalités de chauffage dans les serres expérimentales (axe 3)

4.3.1 Effet de la position des tuyaux de chauffage de végétation

Lorsque les Forcas sont en position basse, la température au fil de culture est identique à la position haute mais celle en bas de la canopée est plus élevée. La température globale de la plante est donc plus élevée. Changer la position des tuyaux représente un faible investissement et permettrait une température plus importante, c'est donc intéressant. De plus, étant donné que la chaleur monte, mettre le Forcas en position basse limite les gradients verticaux de température qui peuvent être préjudiciables.

Un des objectifs de la relocalisation des tuyaux était de voir s'il y avait moins de maladies lorsque le tuyau est en position basse : le tube est censé augmenter la température des feuilles à proximité et augmenter leur transpiration et donc l'hygrométrie, créant des conditions favorables à la germination des spores. Etant donnée qu'il y a moins de feuilles en bas, il y aurait donc moins d'augmentation d'hygrométrie. Cependant, dans notre étude nous n'avons pas observé de différence d'humidité absolue en haut de la canopée entre les deux modalités de chauffage (différence non significative et non répétée).

4.3.2 Effet du brassage d'air

Le brassage d'air entraîne une forte homogénéisation verticale de la température et de l'humidité, ce qui permet d'avoir des conditions optimales pour les plantes à tous les niveaux. Avec ou sans brassage, la température en haut de la canopée est identique. Avec brassage, la température en bas de la canopée est plus élevée que sans. Ceci est probablement dû au fait que le brassage permet de "mélanger" l'air chaud contenu entre le haut de la canopée et le toit de la serre avec l'air plus frais en bas de la canopée. Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait placer des capteurs au-dessus des plantes. Cette observation est intéressante puisqu'elle permet de valoriser l'air chaud au-dessus de la canopée et donc de réaliser des économies d'énergie.

4.3.3 Etude de la température de fruit et de feuille

De par son inertie, le fruit se réchauffe plus lentement le matin et se refroidit plus lentement le soir que les feuilles. Les risques de condensation sont donc plus importants sur fruit le matin et sur feuille le soir. Les infections par *Diddymella brionae* ont lieu au stade précoce du fruit, lorsque la fleur y est encore attachée. L'infestation se fait par le point de fixation de la fleur, la condensation sur celle-ci a donc vraisemblablement une importance et étudier la température de fleur paraît être une piste intéressante pour la lutte contre la pourriture noire.

4.3.4 Conséquences agronomiques

Les conséquences agronomiques des différences de climats ont été peu investiguées et développées. Ceci peut s'expliquer de plusieurs façons. Premièrement, les producteurs ne séparent pas les rendements par petites zones de serre, ce qui rend difficile leur comparaison avec l'hétérogénéité observée. De plus, la mise en place de notations dans ces structures est plus complexe que dans des sites d'expérimentation. Ensuite, le Ctifl a rencontré des problèmes lors des deux premières cultures



Figure 50 Photographie des symptômes de la seconde culture au Ctifl

(jaunissement des feuilles (figure 50), rendement moins élevés que les années précédentes...). Ces problèmes peuvent être dus à la présence d'oxydes d'azote dans le CO₂ injecté dans les serres provenant des fumées de chaudière ou de résidus phytotoxiques présents dans l'eau d'arrosage (provenant de la Loire). Ces difficultés rendent la comparaison des rendements avec ceux du producteur complexes. Concernant la position des Forcas, et les brasseurs d'air, aucune différence de rendement n'a été observée. En effet, dans la serre 13, le rendement valait 19,7 kg.m⁻² dans les deux modalités de chauffage (df=1, F=0,009, p-value=0,926). Le rendement en absence de brassage valait 19,7 kg.m⁻² contre 19,3 kg.m⁻² en présence de brassage. Cette différence n'est pas significative (df=2, F=0,662, p-value=0,53719). Il est donc difficile de conclure quant à l'efficience agronomique de ces équipements.

5 Conclusion

Les objectifs de ce stage étaient de voir si les conditions climatiques étaient homogènes sur les plans verticaux et horizontaux sur un site de production de concombre, si le climat diffère entre la SCEA Cheminant et le Ctifl afin d'évaluer la transposition des résultats de la recherche à la production et enfin, d'évaluer les effets de deux modalités de chauffage et de deux modalités de brassage d'air sur le climat.

Des différences de température et d'humidité ont été observées, tant sur les plans horizontaux que verticaux. En effet, les stations proches de la paroi paraissent plus sèches et plus chaudes que celles plus éloignées. La station la plus proche de la chaudière est la plus chaude et la plus sèche. La station à proximité de la centrale pilote est la plus proche de la consigne de température et la plus froide. Il n'y a donc pas de risques de dommages liés au froid mais il y en a liés à une température trop élevée et une hygrométrie trop faible.

La comparaison entre les deux sites a mis en évidences des différences. Le site de production est plus chaud. Il est également plus humide la nuit et plus sec par beau temps. Les plantes y subissent donc plus de variation d'humidité. Les conditions chaudes et sèches de la journée semblent moins adaptées au développement des plantes (en été), les conditions nocturnes humides semblent plus adaptées au développement des champignons. Ces petites différences ne remettent pas en cause la transposition des résultats expérimentaux du Ctifl mais nécessitent certaines précautions quant à l'interprétation des résultats, notamment ceux d'essais concernant les champignons pathogènes ou la gestion de la déshumidification des serres.

La comparaison des impacts sur le climat de la position du Forcas a montré que, la position basse du tuyau de chauffage a l'avantage de réduire le gradient vertical de température en augmentant la température du bas des plantes. Le brassage d'air a également un effet de réduction de l'hétérogénéité climatique et d'augmentation de la température du bas de la canopée, par valorisation de l'air chaud entre le haut de la canopée et le toit de la serre.

Ce stage était un des premiers travaux de l'équipe EPHor dans le projet CONSER, et ne s'inscrivait que dans une des actions de celui-ci, il reste donc beaucoup de chose à améliorer. Une des améliorations intéressante serait de coupler les différences climatiques observées à des différences agronomiques, ce qui nécessiterait des notations régulières localisées aux mêmes endroits que les capteurs. Cependant, des résultats intéressants ont été obtenus et sont encourageant quant à la méthode employée et aux possibilités d'amélioration de la culture de concombre sous serre.

6 Références bibliographiques

- Aaslyng J.M., Lund J.B., Ehler N., Rosenqvist E. (2003) IntelliGrow: a greenhouse component-based climate control system. *Environmental Modelling & Software*, 18:657–666.
- Brajeul E. (2001) Le concombre, monographie. Editions Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris, 349p.
- Djikou M.S. (2006) Calcul de l'ETP PENMAN MONTEITH à différents pas de temps sur quatre sites du Haut Bassin de l'Ouémé. Institut de Recherche pour le Développement, Djougou, 34p.
- Foyer CH, Bloom AJ, Queval G and Noctor G. (2009) Photorespiratory metabolism: genes, mutants, energetics, and redox signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 60:455–484.
- FranceAgriMer (2013). Réseau des nouvelles des marchés, 2013. Le concombre en 2012. p.1-4.
- FranceAgriMer (2012). Les filières des fruits et légumes - Données 2011. p.32.
- Grimstad S.O. and Frimanslund E. (1993) Effect of different day and night temperature regimes on greenhouse cucumber young plant production, flower bud formation and early yield. *Scientia Horticulturae*, 53:191-204.
- Hatfield J.L. and Burke J.J. (1991) Energy exchange and leaf temperature behaviour of three plant species. *Environmental and Experimental Botany*, 31:295-302.
- Jewett T. and Jarvis W. (2001) Management of the greenhouse microclimate in relation to disease control: a review. *Agronomie*, 21:351-366.
- Kaiser E., Morales A., Harbinson J., Kromdijk J., Heuvelink E. and Marcelis L.F.M. (2014) Dynamic photosynthesis in different environmental conditions. *Journal of Experimental Botany*.
- Kang H-M., Park K-W. and Saltveit M.E. (2002) Elevated growing temperatures during the day improve the postharvest chilling tolerance of greenhouse-grown cucumber (*Cucumis sativus*) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 24:49–57.
- de Koning A.N.M. (1990) Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, 45:117-127.
- Körner O. and Challa H. (2003) Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 39:39-59.
- Kümmerlen B., Dauwe S., Schmundt D., Schurr U. (1999) Thermography to measure water relations of plant leaves. *Handbook of computer vision and applications*, 3:763-781.
- Liebig H.P. (1981) A growth model to predict yield and economical figures of the cucumber crop. *Acta Horticulturae*, 118:165-174.
- Majdoubi H., Boulard T., Fatnassi H. and Bouirden L. (2009) Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse : An experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149:1050-1062.

Marcelis L.F.M. and Baan Hofman-Eijer L.R. (1993) Effect of temperature on the growth of individual cucumber fruits. *Physiologia Plantarum*, 87:321-328.

Mashonjowa E., Ronsse F., Mubvuma M., Milford J.R. and Pieters J.G. (2013) Estimation of leaf wetness duration for greenhouse roses using a dynamic greenhouse climate model in Zimbabwe. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95 :70-81.

Mezrhab A., Elfarh L., Naji H. and Lemonnier D. (2010) Computation of surface radiation and natural convection in a heated horticultural greenhouse. *Applied Energy*, 87:894-900.

Oerke E-C., Steiner U., Dehne H-W. and Lindenthal M. (2006) Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of Experimental Botany*, 57:2121–2132.

Opdam J, Schoonderbeek G, Heller E. (2005) Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. *Acta horticulturae* , 691:517-524.

de Parceveaux S., Huber L. (2007) Bioclimatologie - concepts et applications. Edition quæ, 336p.

de Parceveaux S. (1990) Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie, éditeurs : CILF - INRA - Météo France, 323p.

Perry K.B. and Wehner T.C. (1996) A heat unit accumulation method for predicting cucumber harvest date. *HortTechnology*, 6:27-30.

Rietze E., Wiebe H.J. (1989). Limits of a short-term temperature decrease as a base for on-line control. *Acta Horticulturae* 248 :345- 348.

Rosenberg N.J., Blad B.L. and Verma S.B. (1983) Microclimate - The Biological Environment. Wiley, New York, NY, 2nd edn., 495p.

Savvides A., van Ieperen W., Dieleman J.A. and Marcelis L.F.M (2013) Meristem temperature substantially deviates from air temperature even in moderate environments: is the magnitude of this deviation species-specific ? *Plant, Cell and Environment*, 36:1950-1960.

Sentelhas P.C., Marta A.D., Orlandini S., Santos E.A., Gillespie T.J. and Gleason M.L. (2008) Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. *Agriculture and Forest Meteorology*, 148:392–400.

van Straten G., Challa H., Buwalda F. (2000) Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26:221-238.

Tantau H-J., Lange D. (2003) Greenhouse climate control: an approach for integrated pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40:141-152.

Vadiee A. and Martin V. (2012) Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:5087-5100.

Yang S., Logan J. and Coffey D.L. (1995) Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74 :61-74.

Yang X., Short T.H., Fox R.D. and Bauerle W.L. (1990) Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51:197-209.

Zhu X-G., Ort D.R., Whitmarsh J. and Long S.P. (2004) The slow reversibility of photosystem II thermal energy dissipation on transfer from high to low light may cause large losses in carbon gain by crop canopies: a theoretical analysis. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1167–1175.

  	<p>Diplôme / Mention :</p> <p>Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)</p> <p>Parcours : Productions végétales spécialisées (PVS)</p> <p>Option : Filière de l'horticulture et du végétal urbain (FHVU)</p>
Auteur(s) : Clément PINOIT Date de naissance* : 01/04/1991	Organisme d'accueil : Agrocampus Ouest Angers Adresse : 2 rue André le Nôtre 49 045 Angers
Nb pages : 33 Annexe(s) : 0	
Année de soutenance : 2015	Maître de stage : Etienne CHANTOISEAU, Pierre-Emmanuel BOURNET
<p>Titre français : Analyse du climat dans les serres de concombre - Comparaison entre site expérimental et site de production</p> <p>Titre anglais : Climate analysis in cucumber greenhouses - Comparison between an experimentation site and a production site</p>	
<p>Résumé : Les objectifs de ce stage étaient d'évaluer l'hétérogénéité du climat dans les serres de concombre sur les plans horizontaux et verticaux dans un site de production (SCEA Cheminant), de comparer les climats entre un site d'expérimentation (Ctifl de Carquefou) et un site de production et d'évaluer les impacts sur le climat de 2 positions du tuyau de chauffage et du brassage d'air. Pour cela, 4 chaînes de capteurs, chacune constituée de 4 capteurs de température, 4 capteurs d'humidité relative et 4 thermocouples ont été réalisées. L'angle Est de la serre du producteur est plus chaud et plus sec que le point central. Ceci s'explique par sa proximité de la chaudière. Le haut de la canopée est plus chaud par fort ensoleillement et plus froid la nuit ou par temps gris. Ceci s'explique par l'exposition au soleil et la proximité des tuyaux de chauffage. Le site de production est régulièrement plus chaud et plus humide que le site expérimental. Les écarts d'hygrométrie peuvent être importants et nécessitent donc de prendre des précautions quant aux conclusions tirées des expérimentations notamment lors d'essais sur la déshumidification ou sur les pathogènes fongiques. Positionner les tuyaux de chauffage de végétation proche du collet des plantes plutôt que proche de la canopée permet d'augmenter la température en bas des plantes sans entraîner de modifications sur la température à leur cime. De même, l'utilisation de ventilateurs pour brasser l'air permet d'homogénéiser la température et de valoriser la couche d'air chaude située au-dessus de la canopée.</p>	
<p>Abstract : Abstract (1600 caractères maximum) : The aims of this internship were to estimate climate heterogeneity in cucumber greenhouses, on horizontal and vertical axes in a production greenhouse (SCEA Cheminant), to compare climate between an experimentation greenhouse (Ctifl, Carquefou) and a production one and to evaluate impacts on climate of 2 heating systems positions and 2 ventilation systems. For this, 4 sensors channels containing 4 temperature sensors, 4 humidity sensors and 4 thermocouples have been made. Est corner of the production greenhouse is hotter and dryer than Central point. It can be explained by its proximity of the boiler. The higher point of the canopy is hotter when the weather is sunny and colder by night or cloudy weather. It is caused by sun exposure and proximity of heating systems (which are on the ground). Production site is hotter and wetter than experimentation site. Humidity gaps may be important and require to be careful with the results of experimentation about dehumidifying or moisture management. Putting heating pipes close to the base of plants instead of close to the canopy allows to increase temperature at the bottom of plants without changing the temperature at their top. Using fans to brew air allows to homogenize temperature and to use the hot air which is between plants and the rooftop of the greenhouse.</p>	
<p>Mots-clés : concombre, serre, climat, expérimentation, production</p> <p>Key Words: cucumber, greenhouse, climate, experimentation, production</p>	