



HAL
open science

Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre

Thybaud Brazeau

► **To cite this version:**

Thybaud Brazeau. Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre. Sciences agricoles. 2015. dumas-01206422

HAL Id: dumas-01206422

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01206422>

Submitted on 29 Sep 2015

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

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

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2014-2015

Spécialité : Horticulture

Spécialisation (et option éventuelle) :

Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés

Mémoire de Fin d'Études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre

Par : Thybaud BRAZEAU



Soutenu à Angers le 11/09/2015

Devant le jury composé de :

Président : Mickaël DELAIRE

Maître de stage : Serge LE QUILLEC

Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU

Autres membres du jury :

Pierre-Emmanuel BOURNET

François GREGOIRE

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

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

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

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

Date et signature du maître de stage⁽²⁾ :

Droits d'auteur :

L'auteur⁽³⁾ autorise la diffusion de son travail

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

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

Date et signature de l'auteur :

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

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

Oui Non

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

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je remercie Eric Brajeul pour m'avoir accueilli sur le centre Ctifl de Carquefou.

Je remercie Serge Le Quillec, et Benjamin Albert, de m'avoir encadré durant le stage et de m'avoir apporté les informations nécessaires à la bonne rédaction de mon mémoire de fin d'études.

Je remercie également Romain Barette, Dominique Lesourd, Denis Loda et Dora Rouxel pour leur écoute, leur disponibilité, leur contribution à la réalisation de ce mémoire et leur aide précieuse sur tous les relevés et notations.

Je remercie Agathe Bombail, Samuel Collin et Clément Pinoit pour leur aide, leur bonne humeur et leurs échanges de connaissances.

Je remercie l'équipe d'ouvriers, gérée par Yannick Amiaud, pour leur travail important, sans lequel les expérimentations menées ne seraient pas possibles.

Enfin, je remercie mon tuteur, Etienne Chantoiseau, pour sa disponibilité et son aide réactive.

Liste des abréviations

AVS : Active ventilation system (Système de ventilation active)

CA : chiffre d'affaires

cm : centimètre

CO₂ : dioxyde de carbone

DH : Déficit hydrique

Forcas : tube de chauffage en végétation

ha : hectare

h : heure

HR : Humidité relative

HT : Hors taxe

J : Joule

kg : kilogramme

kWh : kilowattheure

L ou l : litre

LAI : Leaf Area Index (Indice de surface foliaire)

m : mètre

m² : mètre carré

PAR : Photosynthetically active radiation (Rayonnement photosynthétiquement actif)

PE : tube de chauffage du substrat en polyéthylène

Rail 51 : rail de chauffage au sol de 51mm de diamètre

T : tonne

T° : Température

VPD : Vapor pressure deficit (Déficit de pression vapeur)

€ : euro

Liste des annexes

Annexe I : Dispositif cultural d'une double chapelle	1
Annexe II : Consignes climatiques des différentes serres sur l'ensemble de la culture.....	2
Annexe III : Evolution du délai floraison-récolte en serre témoin.....	3
Annexe IV : Relation entre le nombre de fruits sur les plantes et le diamètre de tige en serre témoin.....	4
Annexe V : Mise en relation de l'utilisation du pad cooling avec la baisse de rendement du mois d'avril	5

Liste des illustrations

Figure 1 : Répartition de la production mondiale de tomates en 2013 (Source : FAO Stat)	1
Figure 2 : Répartition du rayonnement incident sur une feuille de tomate (d'après WACQUANT, 1995)	7
Figure 3 : Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques.....	9
Figure 4 : Emplacement des parcelles du dispositif expérimental en serre témoin	15
Figure 5 : Moyennes hebdomadaires des températures 24h de serres	19
Figure 6: Consommation de gaz cumulée des différentes modalités et rayonnement	20
Figure 7 : Consommation électrique cumulée des différentes modalités.....	21
Figure 8 : Croissance hebdomadaire cumulée au 30 août	22
Figure 9 : Evolution des stades de floraison et de récolte	23
Figure 10 : Evolution de la distance entre l'apex et la première fleur	24
Figure 11 : Evolution du diamètre de tige moyen	24
Figure 12 : Nombre de fruits par m ² de culture.....	25
Figure 13 : Evolution du LAI estimé pour 18 feuilles	26
Figure 14: Rendement commercialisable total cumulé jusqu'au 31 août	27
Figure 15 : Calibre moyen des fruits commercialisables par date de récolte.....	29
Figure 16 : Prix d'expédition hors taxe de la tomate des années précédentes	33

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les grandeurs permettant de caractériser le taux d'humidité	5
Tableau 2 : Comparaison du système AVS et de la serre semi-fermée par rapport à une serre classique	13
Tableau 3 : Dispositif expérimental de l'essai « conduites climatiques »	15
Tableau 4 : Résumé des principales différences entre les serres concernant les consignes climatiques	16
Tableau 5 : Comparaison des moyennes de températures des 3 modalités.....	19
Tableau 6: Comparaison de la consommation en gaz des différentes modalités par rapport à la serre témoin.....	21
Tableau 7 : Comparaison de la consommation électrique des différentes modalités par rapport à la serre témoin	21
Tableau 8 : ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif de la croissance cumulée au 30 août ..	22
Tableau 9 : Test de Newman-Keuls de l'ANOVA de la croissance cumulée au 30 août.....	22
Tableau 10 : Rendement après 25 semaines de récolte	27
Tableau 11 : Vérification des postulats de l'ANOVA du rendement cumulé.....	27
Tableau 12 : ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif du rendement cumulé.....	27
Tableau 13 : Test de Newman-Keuls de l'ANOVA du rendement cumulé.....	28
Tableau 14 : Poids moyen des fruits et nombre de déchets.....	29
Tableau 15 : Estimation de la consommation en gaz 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47.....	30
Tableau 16: Estimations des consommations en gaz des différentes modalités jusqu'en semaine 47.....	30
Tableau 17 : Estimation de la consommation en électricité 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47	30
Tableau 18 : Estimations des consommations en électricité des différentes modalités jusqu'en semaine 47.....	30
Tableau 19 : Estimation de la consommation en eau 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47.....	30
Tableau 20 : Estimations des consommations en eau des différentes modalités jusqu'en semaine 47.....	31
Tableau 21 : Estimation de la consommation en CO ₂ liquide 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47	31
Tableau 22 : Estimations des consommations en CO ₂ liquide des différentes modalités jusqu'en semaine 47.....	31
Tableau 23 : Résumé des coûts de fonctionnement présentant une différence entre les modalités	32
Tableau 24 : Calcul de la moyenne du pourcentage du rendement total de la culture 2014 atteint en semaine 35 par les serristes professionnels nantais	33
Tableau 25 : Estimation des rendements cumulés fin de semaine 47 pour l'année 2015	33
Tableau 26 : Estimation des chiffres d'affaires cumulés en fin de semaine 47	34
Tableau 27 : Comparaison des gains estimés par rapport à la serre témoin.....	34

Sommaire

I. INTRODUCTION	1
1. LA TOMATE : GENERALITES	1
2. LA PRODUCTION DE TOMATES DANS LE MONDE, EN EUROPE ET EN FRANCE.....	1
3. LA TOMATE HORS-SOL SOUS SERRE	2
4. LA SERRE : UNE DEPENSE ENERGETIQUE.....	2
5. LES ENJEUX DE LA FILIERE « SERRE »	2
6. PROBLEMATIQUE	3
7. ANNONCE DU PLAN.....	3
II. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. LES PARAMETRES CLIMATIQUES	3
<i>Température</i>	4
<i>Humidité</i>	5
<i>CO₂</i>	6
<i>Rayonnement</i>	7
<i>Photosynthèse</i>	8
<i>Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques</i>	9
2. ECONOMIES D'ENERGIE	9
<i>Le système de ventilation active (AVS)</i>	10
<i>La serre semi-fermée</i>	11
<i>Comparaison de systèmes innovants à une serre classique</i>	13
III. MATERIEL ET METHODES	13
3. MATERIEL VEGETAL	13
4. MATERIEL TECHNIQUE.....	14
5. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	15
6. CONSIGNES CLIMATIQUES.....	16
7. VARIABLES MESUREES.....	17
<i>Suivi agronomique</i>	17
<i>Suivi phénologique et morphologique</i>	17
<i>Paramètres climatiques</i>	17
<i>Analyses statistiques</i>	18
<i>Estimations</i>	18
IV. RESULTATS	19
1. TEMPERATURES ET CONSOMMATIONS ENERGETIQUES	19
<i>Températures des serres</i>	19
<i>Consommation en gaz</i>	20
<i>Consommation électrique</i>	21
2. DEVELOPPEMENT DES PLANTES	22
<i>Croissance</i>	22
<i>Stades de floraison et de récolte</i>	23
<i>Distance fleur-apex</i>	23
<i>Diamètre de tige</i>	24
<i>Nombre de fruits présents sur les plantes</i>	25
<i>Indice de surface foliaire (LAI)</i>	25
3. PRODUCTION	26
<i>Rendement commercialisable total</i>	26
<i>Calibre</i>	28
4. BILAN ECONOMIQUE	29
<i>Coûts</i>	29
<i>Chiffre d'affaires</i>	32

<i>Bilan</i>	34
V. DISCUSSION	34
VI. CONCLUSION	37
VII. BIBLIOGRAPHIE	38
VIII. SITOGRAFIE	40
IX. ANNEXES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

I. Introduction

1. La tomate : généralités

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est une plante herbacée annuelle de la famille des Solanacées. Elle est originaire de l'Amérique du sud et a été introduite en Europe au début du 16^e siècle par les Espagnols.

La croissance de la tomate peut être déterminée ou indéterminée en fonction des variétés. Sur les variétés à croissance indéterminée, chaque bouquet floral est séparé par trois feuilles. La tige subit une croissance monopodiale au début puis sympodiale après l'apparition de quelques feuilles. Son système racinaire pivotant peut atteindre un mètre de profondeur et reste très dense en surface. La tomate possède des fleurs hermaphrodites et est généralement autogame. La plante produit des fruits charnus de différentes formes et de différentes couleurs en fonction des variétés.

La floraison de la tomate est indifférente au photopériodisme ce qui a facilité son implantation un peu partout dans le monde. Elle peut être cultivée en plein champ, sous abri ou en serre.

2. La production de tomates dans le monde, en Europe et en France

La tomate est produite pour deux marchés distincts : la tomate de marché pour la consommation en frais et la tomate d'industrie pour la transformation et la conserve. Selon la FAO (Food and Agriculture Organization), plus de 170 pays produisent de la tomate ce qui en fait le premier légume cultivé dans le monde avec environ 160 millions de tonnes produites en 2013. La production mondiale est en augmentation constante avec 40 millions de tonnes supplémentaires en 10 ans (FAO Stat, 2013).

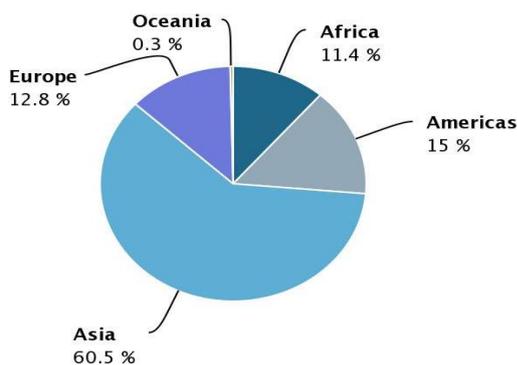


Figure 1 : Répartition de la production mondiale de tomates en 2013 (Source : FAO Stat)

Plus de la moitié de cette production provient d'Asie et notamment de Chine. L'Europe produit près de 13% de la production mondiale ce qui représentait un peu moins de 21 millions de tonnes en 2013. C'est en Europe que l'on trouve les meilleurs rendements mondiaux sur la culture de la tomate. Le rendement européen augmente tous les ans même si la quantité produite chaque année reste globalement la même (FAO Stat, 2013).

La France est le 6^e plus gros producteur européen de tomate. La production annuelle française a chuté il y a une dizaine d'années et s'est stabilisée depuis. Le rendement moyen national, pour sa part, augmente très rapidement depuis 2011. La production sous serre est vendue à 94% pour le marché de frais. Les deux grosses zones de production françaises se situent en Bretagne et dans le sud-est (France Agrimer, 2014).

3. La tomate hors-sol sous serre

La culture sous serre présente de nombreux avantages. Elle permet un contrôle des conditions climatiques dans le but d'optimiser la production en augmentant les rendements, en améliorant la qualité commerciale et en allongeant les périodes de production. D'un point de vue social, elle permet également d'obtenir des conditions de travail plus agréables pour les ouvriers. C'est donc un avantage certain, notamment dans le cas de la tomate qui nécessite des températures assez chaudes pour se développer. Cela demande cependant une technicité élevée puisqu'il faut rentabiliser cet investissement.

Cependant, la serre est un outil qu'il faut maîtriser pour qu'il soit intéressant. En effet, l'installation d'une serre représente un investissement important. C'est une technologie qui va nécessiter du personnel qualifié et qui va évoluer rapidement : elle doit donc être bien utilisée pour obtenir une rentabilité correcte pour le producteur. La concurrence internationale étant rude, il est nécessaire pour les producteurs de réduire au maximum leurs coûts de production pour être compétitif tout en conservant une certaine rentabilité.

4. La serre : une dépense énergétique

La dépense énergétique d'une serre représente environ 30% des coûts de production d'une culture. C'est donc un facteur d'importance majeure. Le contexte économique actuel, avec un marché concurrentiel difficile pour les serristes, ainsi que le contexte social, avec une préoccupation environnementale généralisée, rendent ces questions de réduction de consommation d'énergie primordiales pour les producteurs. Il devient de plus en plus important d'utiliser des énergies renouvelables et d'améliorer l'efficacité de l'énergie utilisée pour augmenter la compétitivité de la filière française (GRISEY, 2007).

Le Ctifl (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes) travaille, entre autres, sur ce sujet. Pour ce faire, le Ctifl met en place différentes expérimentations chaque année. Le but est donc de conseiller les producteurs serristes pour assurer leur viabilité en leur proposant des solutions pour augmenter leur productivité ainsi que leur rentabilité.

5. Les enjeux de la filière « serre »

L'équipe « serre » du Ctifl a pour ambition de répondre à différents enjeux touchant la filière française serres verres chauffées. Leur but est donc de proposer des solutions applicables chez les producteurs permettant d'y répondre.

Les enjeux de la filière se situent à différents niveaux. Le principal objectif reste évidemment ciblé sur la compétitivité des entreprises françaises. Des solutions doivent donc être proposées pour réduire les coûts de production (notamment la consommation énergétique) optimiser les systèmes de production et améliorer les rendements des cultures. Mais les enjeux sont également sociologiques car la filière « serre » a besoin de se développer. Pour ce faire, elle doit pouvoir proposer des produits répondant aux attentes qualitatives, commerciales et organoleptiques du consommateur. Elle doit également travailler son image et montrer au grand public qu'elle cultive dans le respect de l'environnement : réduire l'impact carbone des serres, réduire l'utilisation de produits phytosanitaires, favoriser les techniques de lutte

intégrée, etc. Ceci dans le but de faire évoluer positivement le regard du consommateur, pour l'instant plutôt mitigé, sur cette filière et donc de permettre son développement.

Pour répondre à ces objectifs, le Ctifl a fait construire de nouvelles serres en 2013 possédant différentes technologies récentes et utilisées par les producteurs. Dans chaque compartiment, des équipements spécifiques différents ont été installés pour être étudiés et ainsi jauger leur intérêt sur la culture. Les programmes d'expérimentation mis en place portent sur :

- L'énergie et les équipements
- Les techniques culturales (maîtrise climatique, fertirrigation, gestion des déchets)
- La physiologie des cultures
- Le matériel végétal
- La qualité des produits
- La protection intégrée

6. Problématique

Dans cet objectif d'efficacité énergétique, l'objectif principal de cette étude portera sur l'amélioration de la rentabilité de la culture de tomate sous serre pour les producteurs français. Cela passe par une évaluation des différentes conduites climatiques expérimentées sur le site de Carquefou ce qui correspond à l'utilisation des différents matériels installés : le système de Ventilation Active et la serre semi-fermée. Ces matériels seront étudiés pour définir s'ils présentent un intérêt technico-économique sans pour autant pénaliser les résultats agronomiques ou la gestion du climat.

7. Annonce du plan

La première partie sera dédiée à une analyse bibliographique des principaux paramètres susceptibles d'avoir un impact sur la culture de la tomate hors-sol sous serre et des matériels qui seront utilisés dans l'expérimentation.

La deuxième partie présentera les matériels végétal et technique ainsi que le dispositif expérimental utilisé pour répondre à la problématique.

Dans une troisième partie, les résultats des différentes conduites climatiques seront présentés, tant au niveau de la production et du développement des plantes qu'au niveau des consommations énergétiques. Une analyse technico-économique sera ensuite réalisée pour déterminer si l'investissement dans les matériels étudiés est intéressant ou non pour les producteurs de la filière serre française.

II. Analyse bibliographique

1. Les paramètres climatiques

Le bon déroulement d'une culture de tomates sous serre dépend de la gestion d'un certain nombre de facteurs. La maîtrise de ces facteurs va avoir un impact direct sur le développement des plantes et sur leur production.

Température

Le développement de la tomate est directement dépendant de la température ambiante, comme pour la majorité des plantes. Etant originaire d'une région assez chaude, la tomate possède un zéro de végétation, assez élevé, de 12°C.

C'est pour cela que la température a un très fort impact sur le rendement et le calibre des tomates. L'optimum de température pour le développement des fruits se situe entre 18 et 22°C. En dessous de 14°C les fruits ne se développent pas assez pour avoir une valeur marchande. D'un autre côté, des températures supérieures à 26°C vont provoquer des problèmes de libération du pollen et réduire la quantité de matière sèche que la plante va acheminer vers les fruits. Ces problèmes vont se répercuter sur les grappes avec des déformations, des nombres de bourgeons réduits ou des fruits parthénocarpiques. La température a également un impact fort sur le temps de maturation des fruits : plus elle est élevée, et plus les fruits pourront être récoltés rapidement. De plus, les fruits sont plus sensibles à des élévations de température quand ils sont proches de la maturité. La température est donc très importante au niveau des fruits et des méristèmes mais semble l'être beaucoup moins pour le reste de la plante (ADAMS et al, 2001).

Il est également important de maîtriser la différence de température entre le jour et la nuit. En effet, même si la tomate a besoin de températures assez élevées pour se développer et produire en quantité, elle ne le fera que si elle est sujette à de légers stress. Comme la grande majorité des plantes, si la tomate se trouve dans des conditions idéales, elle va avoir tendance à se développer végétativement. Les producteurs étant intéressés par les fruits de la plante et non par les feuilles, ils ont donc tout intérêt à infliger de légers stress à la plante, qui vont permettre d'inciter la plante à produire des bouquets, sans pour autant la pénaliser dans son développement. C'est le rôle que vont avoir les températures de nuit qui vont être conservées beaucoup plus basses que les températures de jour. Plus cette différence est marquée, plus les plantes vont être génératives mais d'un autre côté, des températures de jour et de nuit égales vont aussi favoriser le développement végétatif. Il faut donc trouver le juste milieu (VITRE, 2003).

Il a été montré qu'une baisse de la température ambiante pendant la nuit jusqu'à 10°C n'avait aucun effet sur le taux d'échange de CO₂ de la plante. De petites différences non significatives ont été observées sur la respiration pendant la nuit mais aucune influence sur le rendement des plantes n'a été constatée. Ceci confirme que le raisonnement par intégration de température sur 24 heures fonctionne bien (HUDCKSTADT et al, 2013).

L'intégration de température sur 24 heures est une technique basée sur la capacité de la plante à réagir à la moyenne des températures reçues sur une certaine période plutôt qu'à la température exacte reçue à chaque seconde. Concrètement, elle consiste en une augmentation de la température ambiante lorsque la plante se trouve dans des conditions favorables à la photosynthèse (en journée) et à une diminution lorsque la plante se trouve dans des conditions défavorables à la photosynthèse (pendant la nuit). Ceci permet d'obtenir la même moyenne de température sur 24 heures qu'en conditions normales tout en stimulant davantage la plante en

journee et en economisant de l'energie pendant la nuit. Cette technique n'a aucune incidence sur la croissance ni sur la production de la plante (DIELEMAN et al, 2005).

La temperature ambiante est donc tres importante dans le developpement et la production de la plante. Mais la temperature de la plante l'est egalement. En effet, pour un rayonnement donne, la croissance d'une plante est inversement proportionnelle a l'augmentation de sa temperature racinaire. Plus la temperature racinaire augmente et plus la pression racinaire va augmenter ce qui empêche la plante de transpirer normalement. Cette trop forte pression racinaire va induire une penetration de l'eau dans les espaces intercellulaires de la plante et perturber sa photosynthese (BRAKEBOER, 2008).

D'un autre cote, il apparait que la temperature des feuilles est pratiquement tout le temps inferieure a la temperature de l'air. Une relation de proportionnalite a d'ailleurs ete demontree entre cette difference de temperature air-feuille et le deficit de pression vapeur (VPD) : plus l'air est sec et plus la difference de temperature air-feuille est elevee. L'ouverture des stomates depend de la concentration en CO₂ dans la chambre sous-stomatique et de la temperature de la feuille. C'est donc un facteur important dans la culture de la tomate (RIGHI et al, 2012).

En resume, la temperature est importante a differents niveaux (air et plante) mais ce sont surtout les differences de temperature (jour-nuit, air-feuille, racine-plante, gradient vertical de temperature, etc) qui doivent etre maitrisees au mieux pour obtenir une culture saine et productive.

Humidité

L'humidite de l'air peut s'exprimer de differentes manieres. Tout d'abord, on peut parler d'humidite relative (HR) qui correspond au rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante. Elle s'exprime donc en pourcentage. Une valeur de 100% d'HR correspond donc a un air qui arrive a son point de rosée et donc l'eau va commencer a condenser. Ce point de rosée etant fonction de la temperature, on utilise plus couramment une autre grandeur : le deficit hydrique (DH). Le DH represente la quantite d'eau que peut encore absorber l'air avant d'atteindre la saturation. Il s'exprime en grammes d'eau par kilogramme d'air sec. Enfin, la derniere grandeur utilisee pour parler d'humidite est le deficit de pression vapeur (VPD). De la meme maniere que le DH, le VPD represente la difference entre la pression vapeur de l'air a saturation et la pression vapeur mesuree. Il s'exprime donc en kiloPascal (PRENGER et al, 2001).

Tableau 1 : Les grandeurs permettant de caracteriser le taux d'humidite

Grandeur	Unité	Valeur au point de rosée de l'air
Humidite relative (HR)	%	100
Déficit hydrique (DH)	g d'eau/kg d'air sec	0
Déficit de pression vapeur (VPD)	kPa	0

L'interet du DH et du DPV est que ceux-ci sont tres peu dependants de la temperature, contrairement a l'HR. C'est pourquoi ils sont plus utilises.

La tomate se développe correctement sur une large gamme d'humidité de l'air mais celle-ci reste néanmoins très importante à prendre en compte. Lorsque les plantes sont jeunes, on va préférer une humidité relative modérée car l'humidité favorise le développement des feuilles. Le développement des feuilles, quant à lui, va permettre à la plante de transpirer plus, et de ce fait l'humidité ambiante risque d'augmenter. Il faut donc avoir une bonne maîtrise de l'humidité pour ne pas tomber dans ce cercle vicieux. De manière générale, en pleine période de culture, on évitera d'avoir des déficits hydriques supérieurs à 10g d'eau/kg d'air sec ou inférieurs à 2g d'eau/kg d'air sec (WACQUANT, 1995).

Une humidité relative élevée associée à une atmosphère enrichie en CO₂ a pour résultat l'augmentation de la conductance stomatique des plantes. Ceci peut être utilisé dans le but de stimuler la photosynthèse, la croissance des plants de tomates et donc leur rendement à travers une augmentation de la matière sèche des fruits. Cependant, pour améliorer ce rendement de manière continue et stable, il faut avoir une bonne maîtrise de la transpiration des plantes. En effet, une humidité plus élevée a tendance à réduire la transpiration de la plante ce qui peut entraîner un problème au niveau de l'assimilation et la distribution des nutriments. D'un autre côté, une augmentation de l'humidité permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante. Une humidité relative de 80% semble être optimale (SUZUKI, 2015).

La température dans une serre peut être significativement réduite en installant des ventilateurs et un système de pad cooling. Ce système se présente sous la forme d'un panneau de cellulose alvéolé que l'on va humidifier lorsqu'il y a besoin. L'air extérieur va ainsi se charger en eau en le traversant et rafraîchir la serre lorsque les ventilateurs l'y pousseront. Cette méthode permet de faire diminuer la température d'environ 4°C par rapport à une serre classique ventilée au maximum. Ce système a pour résultats une baisse de la température mais aussi une forte augmentation de l'humidité relative. Ceci va induire une consommation en eau par les plantes fortement réduite. Le rendement obtenu est équivalent aux serres témoins mais l'humidité cause trop de "cracking" ce qui diminue la quantité de tomates commercialisables (MAX et al, 2009).

CO₂

Le CO₂ est un paramètre très important à prendre en compte dans la gestion d'une culture. En effet, le taux de dioxyde de carbone a un fort impact sur la photosynthèse de la plante puisque c'est un gaz essentiel à sa réalisation. Un enrichissement en CO₂ permet à la fois d'augmenter le calibre et le nombre de fruits sur une culture de tomates sous serre. Le rendement s'en trouve donc fortement augmenté (WACQUANT, 1995).

Il a été démontré que le taux d'échange de CO₂, qui est un facteur déterminant dans la réalisation de la photosynthèse par la plante, augmente avec l'intensité lumineuse, la température et bien sûr avec la concentration en CO₂ de l'air. Des corrélations très fortes ont été mises en évidence. Par exemple, en multipliant par 2,5 la concentration en CO₂ de l'air, on double le taux d'échange de CO₂ (HUDCKSTADT et al, 2013).

Le taux d'échange de CO₂ dépend également de l'ouverture des stomates. Et cette ouverture dépend elle-même de la concentration en CO₂ dans la chambre sous-stomatique ainsi que de la température de la feuille et de son potentiel hydrique. Plus le potentiel hydrique foliaire est

fort, et plus la plante va transpirer. Une plante qui transpire a ses stomates ouverts et par conséquent augmente son taux d'échange de CO₂ par rapport à une plante qui ne transpire pas (RIGHI et al, 2012).

Si cela fait un moment qu'il a été prouvé qu'un enrichissement en CO₂ avait un impact sur le rendement d'une culture de tomate, ce n'est que plus récemment que l'on a testé l'impact sur ses qualités organoleptiques. L'enrichissement en CO₂ d'une culture de tomates permet d'augmenter la concentration des composants organiques de la tomate tels que les lycopes, bêta-carotènes, acide ascorbique et le sucre. D'autre part, il permet une amélioration des qualités organoleptique et commerciale des fruits notamment au niveau de la couleur, de la fermeté, de la saveur mais aussi de l'arôme (ZHANG et al, 2013).

Rayonnement

Comme toutes les plantes, la tomate a besoin de lumière pour se développer. Le rayonnement est primordial dans son développement puisqu'une augmentation de l'intensité lumineuse va avoir un impact sur différents phénomènes physiologiques tels que l'apparition de fleurs, de feuilles, la vitesse de maturation des fruits ou encore le taux de matière sèche dans les fruits (WACQUANT, 1995).

Le rayonnement solaire total reçu par la plante va jouer différents rôles. Une partie du rayonnement reçu ($\approx 20\%$) par la plante va être réfléchi directement. Le reste va être absorbé par la plante. La majeure partie de cette énergie ($\approx 60\%$) va contribuer à la transpiration de la plante qui est une activité primordiale pour son bon développement. Une plus petite part ($\approx 20\%$) va permettre l'élévation de la température de la plante. Enfin, une part minimale ($\approx 5\%$) est utilisée par la plante pour réaliser des réactions biologiques et notamment la photosynthèse (WACQUANT, 1995).

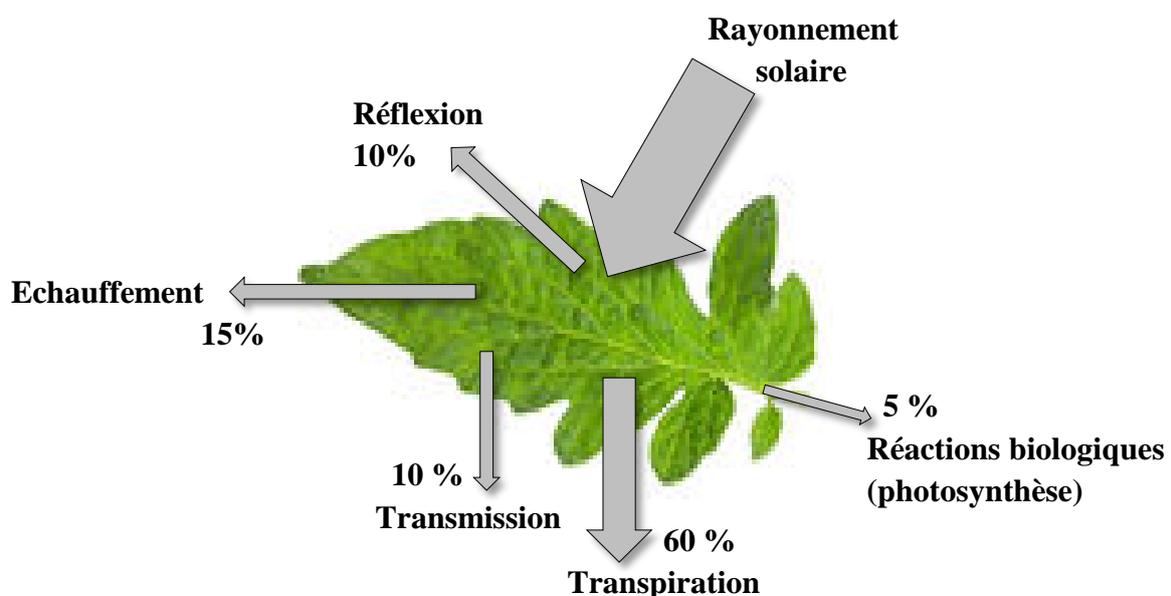


Figure 2 : Répartition du rayonnement incident sur une feuille de tomate (d'après WACQUANT, 1995)

Photosynthèse

La photosynthèse est le mécanisme central du fonctionnement de la plante. Ce phénomène permet la synthèse de sucres et autres molécules organiques par la plante, à partir de l'absorption de CO₂ par ses feuilles et d'eau par ses racines. L'intensité de la photosynthèse est directement liée à la quantité de rayonnement reçu par la plante et plus précisément au PAR (Photosynthetically active radiation). Le PAR correspond aux rayonnements dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 700 nanomètres et que les plantes sont capables d'utiliser pour réaliser leur photosynthèse. Ces rayonnements se situent plus précisément entre 400 et 500 nm ainsi qu'autour de 650 nm (WACQUANT, 1995).

Les photoassimilats produits grâce à la photosynthèse vont ensuite être transportés dans toute la plante et permettre la croissance et l'accumulation de matières sèches dans la plante après avoir été transformés (WACQUANT, 1995).

L'activité photosynthétique d'une plante dépend évidemment de la quantité d'énergie reçue par la plante. Cette quantité d'énergie reçue varie en fonction du rayonnement mais aussi de la surface d'interception du rayonnement que présente la plante. L'activité photosynthétique dépend également de la température et de la teneur en CO₂ de l'air (WACQUANT, 1995).

La surface d'interception du rayonnement peut être quantifiée par le LAI (Leaf Area Index). Le LAI est un coefficient qui correspond à la surface de feuilles présentes par mètre carré. Le LAI donne donc une information très importante et peut être utilisé pour maîtriser au plus près l'effeuillage des plantes. La littérature nous apprend que le rendement des plantes augmente avec le LAI jusqu'à une valeur de 4 (c'est-à-dire 4 m² de feuilles par m² de sol). Au-delà, il semblerait que la plante n'arrive pas à intercepter plus de lumière. L'objectif serait donc de conserver un LAI le plus proche possible de 4 pour optimiser le rendement mais en évitant de le dépasser pour ne pas fatiguer inutilement la plante avec des feuilles supplémentaires (HEUVELINK, 2005).

La quantité de lumière absorbée mais aussi sa distribution verticale ont un fort impact sur la photosynthèse. Il s'avère que l'angle d'élévation de la feuille joue un rôle capital sur la quantité de lumière absorbée. L'angle optimal se situe entre 15° (vers le haut) et -23° (vers le bas). L'augmentation du ratio longueur/largeur des feuilles a un effet positif sur l'absorption de la lumière car cela évite que les feuilles ne se fassent de l'ombre entre elles. Une augmentation de la longueur des entre-nœuds a généralement un effet positif sur l'absorption de la lumière par les feuilles car elles sont ainsi plus espacées. Il semblerait que les deux facteurs « forme de feuilles » et « longueur des entre-nœuds » soient les plus importants en ce qui concerne l'absorption de lumière par la plante et donc sa photosynthèse (SARLIKIOTI, 2011).

Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques

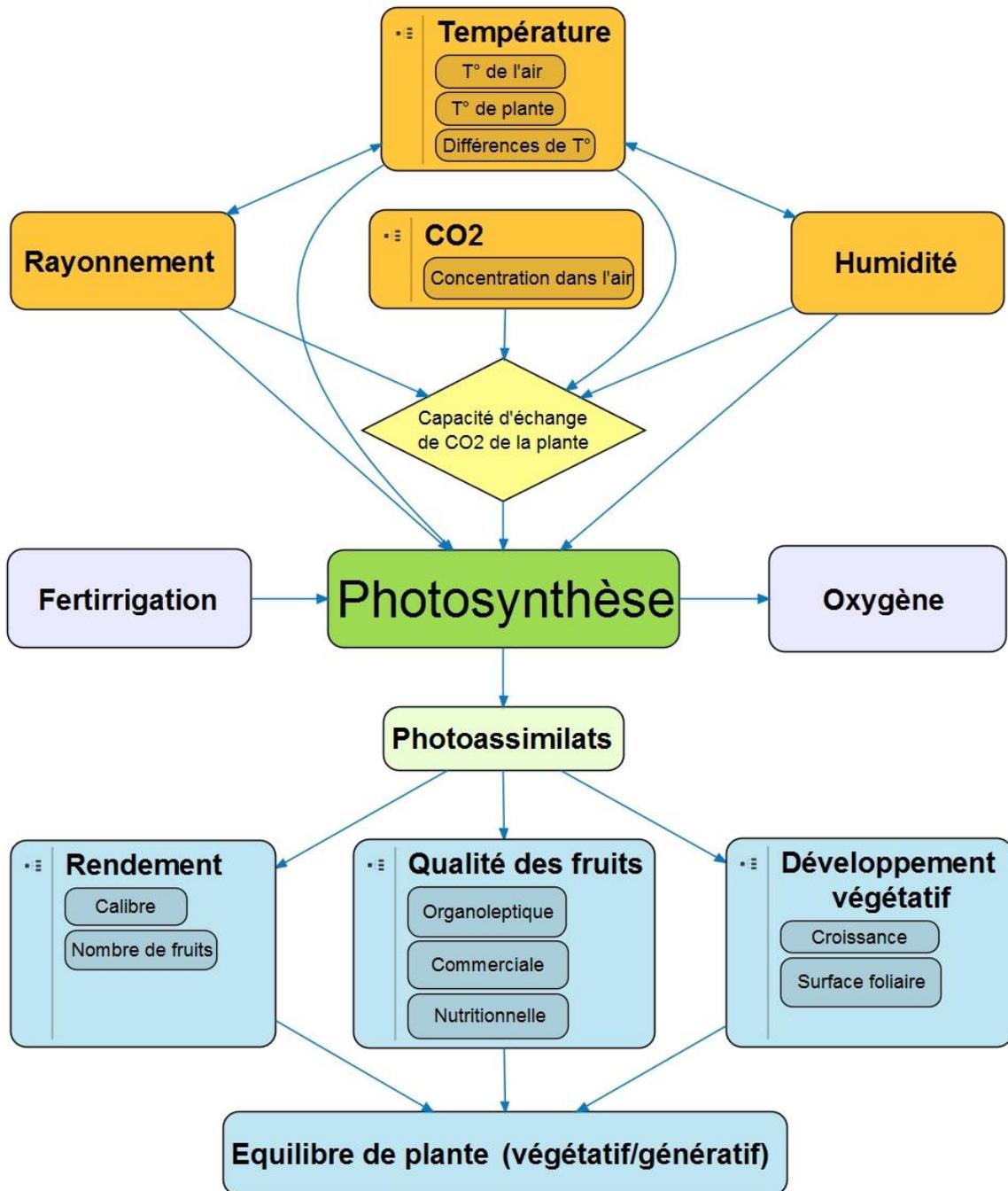


Figure 3 : Synthèse des effets et interactions des paramètres climatiques

2. Economies d'énergie

La culture sous serre est une forme de production intensive avec des rendements par surface en moyenne 10 fois supérieurs aux productions de plein champ. Cependant, ce type de culture est plus technique et plus consommateur en énergie. Différents actions doivent donc être

prises en place pour rendre le système de culture sous serre plus intéressant et respectueux de l'environnement :

- gérer les paramètres climatiques (rayonnement, température, humidité, CO₂, etc) au plus près des besoins de la culture pour limiter les consommations et optimiser la production
- utiliser des énergies renouvelables
- réduire la production de déchets
- optimiser les apports d'eau et de nutriments pour les économiser et ne pas polluer les sols
- faire de la protection biologique intégrée pour limiter l'usage de pesticides

Ces cinq objectifs principaux, s'ils sont atteints, permettraient de tendre vers un système de culture sous serre qui soit durable (VOX et al, 2010).

Dans l'objectif de maîtrise du climat mais aussi du respect des pratiques durables et de l'économie d'énergie, de nombreux systèmes innovants ont été développés. Les cultures sous serre sont très concernées par ces problématiques de développement durable et de contrôle des paramètres climatiques. Dans un but de compétitivité et d'optimisation économique, de nouvelles propositions émergent régulièrement. Le centre Ctifl de Carquefou a fait installer deux de ces équipements innovants au sein de ses serres pour pouvoir tester leur rentabilité.

Le système de ventilation active (AVS)

La ventilation active de la serre fait partie de ces systèmes innovants. Ce système permet l'admission forcée d'air extérieur et peut être couplé avec un échangeur de chaleur dans un but d'économie d'énergie et de pratiques durables (VAN DIJK, 2012).

Les avantages de l'AVS par rapport à une serre classique sont nombreux. Il permet tout d'abord une déshumidification à coût réduit et sans apport d'air chaud. Cette déshumidification se fera par un renouvellement d'air entièrement maîtrisé grâce à l'admission forcée d'air extérieur. Le taux de renouvellement peut être contrôlé très précisément ce qui permet de gérer la déshumidification au mieux. On va ainsi pouvoir maintenir un courant d'air circulaire dans la serre et donc maximiser l'activation des plantes par une efficacité de photosynthèse supérieure.

Grâce à ce système, on va obtenir une sensibilité accrue au niveau de la gestion de la température, de l'humidité et de la concentration en CO₂ dans la serre. Le climat pourra donc être optimal pour la plante avec notamment une amélioration du micro-climat autour des plantes. Grâce à ce brassage d'air maîtrisé et permanent, l'AVS valorisera très bien les systèmes de chauffage basse température ainsi que l'utilisation de la méthode d'intégration de température sur 24h (VAN DIJK, 2012).

Ce système de ventilation active va donc permettre une maîtrise du climat de la serre tout en gardant les ouvrants au maximum fermés. Il va ainsi réduire la pression sanitaire exercée par les ravageurs et les maladies. De plus, l'économie d'énergie réalisée par rapport à une serre classique n'est pas négligeable (VAN DIJK, 2012).

Cependant, ce système a un coût et demande donc à être rentabilisé. Pour une serre classique, on peut estimer le coût d'installation à environ 120€/m². C'est une valeur très difficile à estimer du fait de sa grande variabilité due aux travaux à effectuer sur le terrain, du matériel utilisé, de la surface construite, etc. Pour une serre équipée d'un système AVS, on compte généralement 130€/m² lors de la construction. Cela représente donc un surcoût de 10€/m² environ par rapport à une serre classique. Lors de l'installation de serres pouvant s'étendre sur plusieurs hectares, c'est une valeur qui a donc une très grande importance.

La serre semi-fermée

La serre semi-fermée représente une autre solution aux enjeux cités précédemment, au moins en ce qui concerne la gestion du climat et la protection culturale.

La serre semi-fermée est une innovation relativement récente dans le domaine de l'horticulture. Les résultats globaux montrent que, sous un climat tempéré, une grosse économie d'énergie fossile est réalisable. Cette économie peut représenter entre 25 et 35% dans une serre fermée par rapport à une serre classique. De plus, une augmentation du rendement entre 10 et 20% semble envisageable avec une bonne conduite de culture et les quantités de CO₂ à apporter sont logiquement plus faibles puisqu'il n'y a pas d'aération. Les principales différences des serres fermées par rapport aux serres ouvertes sont les suivantes :

- Humidité plus élevée
- Concentration en CO₂ plus élevée
- Température plus constante
- Température des feuilles plus élevée que la température de l'air
- Flux d'air plus rapides même lorsque le renouvellement est faible
- Gradient vertical de température plus élevé

Les bénéfices potentiels de la serre semi-fermée portent principalement sur l'augmentation du rendement, la réduction d'apport et d'émission de CO₂, l'économie d'eau et l'amélioration de la protection culturale. Le principal inconvénient réside au niveau du gradient vertical de température qui, malgré un meilleur brassage d'air horizontal dans les serres fermées ou semi-fermées, peut atteindre jusqu'à 7°C entre le sol et la tête des plantes (DE GELDER, 2012).

Ce gradient de température est en grande partie dû au taux de renouvellement d'air qui est plus faible quand dans une serre classique ainsi qu'au refroidissement aéraulique lorsque l'air frais est injecté par le bas dans la serre. Ce faible taux de renouvellement d'air va engendrer un taux de CO₂ plus élevé que dans une serre ouverte. Ceci permet d'obtenir des fruits plus fermes et avec un calibre moyen plus élevé. Cependant, un fort taux de CO₂ peut affecter la synchronisation entre la couleur et la fermeté du fruit. Il faudra donc veiller à adapter la

période de récolte pour ces deux paramètres soient acceptables pour le consommateur (FARNETI, 2013).

Au vu des différents avantages développés par la serre semi-fermée, on pourrait penser qu'une serre entièrement fermée serait encore plus intéressante. La serre fermée est un concept assez récent qui est né aux Pays-Bas et qui se base sur une serre sans ouvrants, équipée d'une pompe à chaleur, fonctionnant sur un aquifère qui permet de chauffer en hiver et de refroidir en été, et d'une unité de traitement de l'air. Cette méthode de gestion du climat permettrait d'économiser 30% sur les énergies fossiles, et d'obtenir des rendements 20% meilleurs que pour une serre classique grâce à un taux de CO₂ plus élevé. Le modèle INTKAM a permis d'estimer l'augmentation de rendement à partir de sous-modèles basés sur l'interception lumineuse, la photosynthèse et la répartition de la biomasse. Il confirme les résultats précédents mais les conclusions sont que, sous un climat hollandais, ce type de serre ne représente pas l'optimum économique. L'optimum économique se rapprocherait certainement d'une serre semi-fermée, qui présenterait moins de coût d'installation et qui permettrait un refroidissement par humidification de l'air (HEUVELINK, 2008).

La serre récemment construite sur le centre Ctifl de Carquefou est une Ultra-Clima®. C'est un modèle de serre semi-fermée qui a été conçue à partir d'un partenariat entre un producteur de tomates canadien (Casey Houweling) et l'entreprise néerlandaise Kubo. Elle fonctionne sur cinq principes essentiels :

- La surpression (réduction de la pression sanitaire)
- Une aération très limitée (conservation d'un fort taux de CO₂)
- Le recyclage de l'eau (circuit fermé)
- L'optimisation de l'intensité lumineuse (vitres de grandes largeurs, moins d'ouvrants)
- La réduction de l'utilisation d'énergies fossiles (valorisation du chauffage basse température)

Ces principes cachent des objectifs bien précis. La surpression permet de réduire la pression sanitaire et donc de s'affranchir d'un grand nombre de traitements en réponse à des maladies ou des ravageurs. L'aération limitée a pour but de confiner la CO₂ à l'intérieur de la serre et donc d'augmenter la production. Le recyclage de l'eau permet d'éviter de polluer l'environnement mais surtout de réaliser des économies d'eau. L'intensité lumineuse va être optimisée d'environ 15% grâce à des vitres plus larges dûes à un nombre d'ouvrants en toiture réduit : les ouvrants représentent 3% de la surface du toit contre 21% sur une serre classique.

La serre Ultra-Clima® fait 7 mètres de hauteur sous chéneaux. Cette hauteur relativement élevée a pour but de créer une zone tampon entre la culture et la serre et de permettre une meilleure régulation du climat (JAGERS, 2009).

En bref, la serre semi-fermée permet idéalement d'augmenter les rendements tout en effectuant des économies sur l'énergie utilisée (MARCELIS, 2011).

Cependant, de la même manière qu'une serre équipée d'un système AVS, l'installation d'une serre semi-fermée présente un surcoût non négligeable. Il faut compter en moyenne 30€/m² supplémentaires par rapport à une serre classique soit 150€/m².

Comparaison de systèmes innovants à une serre classique

La serre semi-fermée présente les mêmes avantages qu'un système AVS, souvent en plus efficaces, mais elle présente aussi des désavantages qui ne se retrouvent pas quand on utilise un système AVS. La comparaison de ces deux matériels est donc intéressante pour savoir si les avantages potentiellement plus intéressants de la serre semi-fermée ne sont pas compensés par les désavantages qu'elle apporte.

Tableau 2 : Comparaison du système AVS et de la serre semi-fermée par rapport à une serre classique

	Système AVS	Serre semi-fermée
Pression sanitaire réduite	=	++
Valorisation chauffage basse température	+	++
Augmentation du rendement	=	+
Meilleure gestion de la température	=	+
Gestion de l'humidité plus efficiente	++	++
Valorisation des systèmes de chauffage basse température	=	++
Coût d'installation	-	--
Gradient vertical de température	=	--
Difficulté de gestion du climat en demi-saison	=	-
Conditions de travail pour les ouvriers dues au climat	=	-

III. Matériel et méthodes

3. Matériel végétal

Chaque année, le Ctifl implante un cultivar de tomate témoin dans ses serres, en fonction de ceux choisis majoritairement par les producteurs. Cette année, le cultivar de référence est Clodano. Ce cultivar développé par Syngenta est très vigoureux et très génératif. Clodano permet d'obtenir des productions précoces et possède un potentiel de production élevé dû à sa vitesse de floraison. Ce cultivar permet d'obtenir des grappes de 5 fruits de calibre régulier et d'une belle couleur rouge intense. De plus, Clodano possède de fortes résistances au virus de la mosaïque de la tomate, au *Fusarium oxysporum* (fusariose) et au *Cladosporium fulvum* (cladosporiose) d'après la société de semences qui la commercialise (Syngenta, 2015).

Toutes les plantes ont été greffées sur DRO 141. Ce porte-greffe commercialisé par De Ruiter présente différents avantages. Ses principales caractéristiques sont une très forte vigueur, un très fort potentiel de rendement et une bonne endurance sur la durée de culture. Il a également des effets positifs sur le taux de nouaison et l'uniformité de croissance des tiges avec un faible développement des extra-bras (De Ruiter, 201).

Le semis du porte-greffe a été réalisé le 8 octobre 2014 et le semis du greffon a été effectué la semaine suivante soit le 15 octobre. Le greffage a eu lieu le 30 octobre. Un peu plus d'un mois plus tard, le 3 décembre, les tomates ont été préplantées. La préplantation consiste à poser les jeunes plants greffés sur un film plastique pour favoriser le développement racinaire. On retirera ce film au moment de la plantation pour que les tomates s'enracinent dans les pains de laine de roche.

La plantation a finalement été réalisée le 7 janvier 2015 à une densité de 1,255 plants/m² (2,51 tiges/m² car les plants sont greffés à 2 têtes). Tous les plants sont cultivés sur des pains de laine de roche de la marque Grodan et de dimensions 133 × 15 × 10 cm. A partir du 12 février 2015, la densité a été augmentée à 3,35 tiges /m² par conservation d'un axillaire, appelé extra-bras, sous le 6^{ème} bouquet d'un plant sur trois. Le volume de substrat est de 2,494 l/tige après augmentation de la densité.

4. Matériel technique

Les serres utilisées pour les cultures de tomate se présentent sous la forme de 3 compartiments de 1037 m² chacun orientés sur un axe nord-sud. Ils sont constitués de 6 chapelles de type Venlo de 4 m de largeur et de 8 travées de 5,40 m de longueur (Annexe I). Ces compartiments sont très récents puisqu'ils ont été construits en 2013 et des équipements spécifiques ont été installés dans chacun d'entre eux.

Le premier compartiment est le témoin. C'est donc une serre avec des conditions de culture identiques à celles utilisées par les professionnels :

- Gouttières suspendues pour culture hors-sol sur substrat
- Chauffage par tube rail au sol (rail 51), double tube de chauffage en végétation (forças) et tube de chauffage du substrat en polyéthylène (PE)
- Double écran, thermique et ombrage, en toiture
- Simple écran thermique en parois
- Injection de CO₂ liquide et sur fumées
- Récupération des eaux de pluie et de drainage
- Pilotage automatisé du process
- Ventilation à l'aide de brasseurs d'air un rang sur six

Le deuxième compartiment comprend les mêmes installations auxquelles s'ajoute un système de ventilation active (AVS) de la marque Van Dijk Heating avec admission forcée d'air extérieur et double flux débrayable, qui est connecté à une gaine de distribution d'air par chapelle sous une gouttière de culture. Cette admission d'air forcée permet de réaliser des opérations de déshumidification et de refroidissement aéraulique de la serre.

Le troisième compartiment est une serre semi-fermée Ultra-Clima® de la marque Kubo. Cela signifie qu'il y a un corridor technique au niveau de la paroi sud de la serre. Ce corridor comprend un grand battant latéral et des ventilateurs utilisés pour la recirculation de l'air intérieur et pour l'admission forcée d'air extérieur. Il permet le refroidissement de la serre grâce à un système de pad cooling (refroidissement de l'air grâce à de l'eau froide s'écoulant le long d'un panneau de cellulose alvéolé) et le chauffage grâce à des échangeurs thermiques qui distribuent l'air dans des gaines situées sous chaque gouttière de culture. Ce type de serre possède un nombre réduit d'ouvrants au niveau de la toiture (sept fois moins que dans une serre classique) car ceux-ci ne servent qu'à gérer la surpression engendrée par l'admission forcée d'air extérieur. Le brassage de l'air est important dans ce type de serre ce qui permet d'obtenir une meilleure homogénéité de la température.

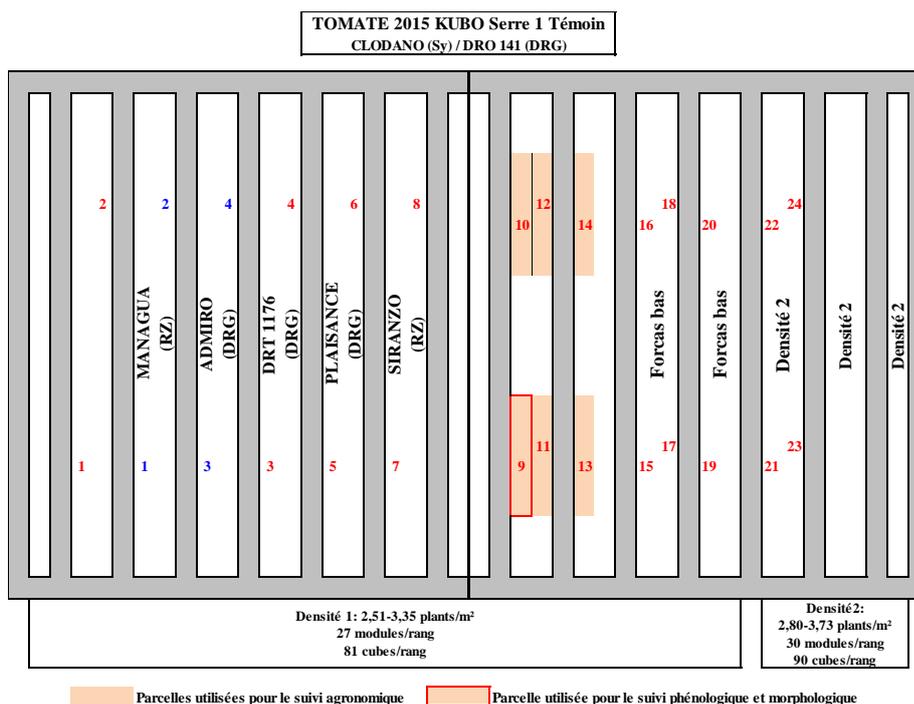
5. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental visant à étudier l'effet de différentes conduites climatiques sur la croissance et la production des tomates est constitué de 18 parcelles réparties dans 3 modalités soit 6 blocs par modalité. Les trois modalités de la variable étudiée sont la serre témoin, la serre équipée du système AVS et la serre semi-fermée.

Tableau 3 : Dispositif expérimental de l'essai « conduites climatiques »

Facteur étudié : effet du climat						
Variable : type de serre (témoin, équipée d'un système AVS, semi-fermée)						
	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5	Bloc 6
Témoin	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14
Système AVS	P 33	P 34	P 35	P 36	P 37	P 38
Semi-fermée	P 57	P 58	P 59	P 60	P 61	P 62

Les parcelles de chaque bloc sont placées exactement au même endroit dans chaque serre. Chaque bloc comprend 8 plantes en tige simple et 4 plantes avec un extra-bras ce qui revient à 16 tiges en tout. Un exemple du parcellaire en serre témoin se trouve ci-dessous.



Toutes les mesures sont réalisées sur la variété Clodano. Les blocs ont été placés au milieu des rangs pour éviter les effets de bordure. Une parcelle élémentaire est composée de 12 tiges à la base et de 16 tiges une fois que la densité est augmentée grâce au développement des extra-bras.

Figure 4 : Emplacement des parcelles du dispositif expérimental en serre témoin

6. Consignes climatiques

Au cours de la culture, les trois serres n'ont pas été tout à fait soumises aux mêmes consignes climatiques. En effet, l'objectif étant de tirer profit au maximum des capacités de chaque serre, les consignes ont été adaptées pour répondre à ce but. Le tableau 4 résume les principales différences entre les trois modalités. Les changements de consignes complets sur l'ensemble de la culture se trouvent en Annexe II.

Tableau 4 : Résumé des principales différences entre les serres concernant les consignes climatiques

		03/12/14	17/12/14	23/12/14	27/01/15	31/03/15
Serre Témoin	Rail 51	65°C		60°C		
	PE				45°C	
	Forcas				60°C	
	Ventilation (volumes/h)				1,9	
Serre AVS	Rail 51	65°C		60°C	45°C	
	PE				45°C	
	Forcas				60°C	45°C
	Ventilation (Volumes/h)				0,65	
Serre Semi-fermée	Rail 51				45°C	
	PE				45°C	
	Forcas				45°C	
	Ventilation (Volumes/h)	4			Entre 5 et 7	
	Pad cooling	Activation à partir du 18/03/2015				

Il est également à noter qu'à partir du 26 avril, la consigne d'aération en serre semi-fermée a été augmentée d'1°C pour améliorer le confinement du CO₂. L'objectif affiché ici était de valoriser au maximum le chauffage basse température dans cette serre. C'est pour cela que les maximums de température ont été définis plus bas dès le début de la campagne. A partir du 31 mars, il a été décidé de faire la même chose dans la serre équipée du système AVS et les maximums ont été ajustés à la même température qu'en serre semi-fermée.

Une autre différence entre les serres dans la gestion climatique concerne l'ouverture des écrans d'ombrage. Ils sont déployés manuellement en serres témoin et AVS lorsque la température extérieure est supérieure à 28°C et que le rayonnement est fort. En revanche, en serre semi-fermée, l'écran d'ombrage reste toujours fermé.

La gestion des fortes chaleurs est donc différente entre les serres. Ceci se retrouve également dans la conduite de l'effeuillage. En serres témoin et AVS, lorsque des températures élevées sont prévues pour la semaine, l'effeuillage va être plus léger pour conserver une grande surface foliaire. Ceci permet d'augmenter la transpiration des plantes et limiter l'augmentation de température à l'intérieur de la serre. En serre semi-fermée, l'effeuillage reste défini à 18 feuilles quel que soit le climat extérieur et la gestion se fait grâce à au pad cooling.

7. Variables mesurées

Suivi agronomique

Deux fois par semaine, des pesées sont réalisées sur les récoltes des 18 parcelles de 12 plantes qui nous intéressent. Ces pesées permettent de déterminer le rendement commercialisable moyen réalisé sur chaque serre, la quantité et la nature des déchets (botrytis, nécrose apicale, fruit vert, fruit fendu, etc) mais aussi d'estimer le calibre moyen et le chiffre d'affaires qu'aurait réalisé un producteur.

Suivi phénologique et morphologique

Chaque semaine, des notations de plantes sont effectuées pour suivre précisément l'état de la culture.

Pour ce faire, différents aspects sont notés sur chaque plante. Le stade de floraison, qui correspond au numéro du dernier bouquet ayant fructifié ou ayant des fleurs ouvertes, est relevé. En parallèle est noté le stade de récolte, qui correspond au nombre de grappes récoltées donc au numéro du dernier bouquet récolté. La charge en fruit est également relevée : le nombre de fruits présents sur la plante dont le diamètre est supérieur à un petit pois est ainsi comptabilisé. Des mesures de croissance de la plante sont aussi effectuées en mesurant la distance entre l'apex de la semaine et celui de la semaine précédente, la distance entre l'apex et le dernier bouquet et le diamètre de la tige au niveau de l'apex de la semaine précédente. Ces trois mesures sont capitales pour déterminer si la plante est trop végétative ou trop générative. Les fleurs ouvertes marquées par des traces de passage de bourdons sont également notées pour quantifier l'activité des auxiliaires pollinisateurs qui jouent un rôle extrêmement important dans la culture. Enfin, un suivi de l'indice de surface foliaire (LAI) est réalisé à travers des notations de longueur et de largeur de feuilles toutes les deux semaines pour permettre de gérer au mieux la conduite de l'effeuillage.

Toutes ces mesures sont réalisées sur la variété Clodano. Les blocs ont été placés au milieu des rangs pour éviter les effets de bordure et au même endroit dans chaque serre. Un total de 108 plantes, réparties en 9 blocs de 12 plantes sur 3 serres, est donc noté chaque semaine.

Paramètres climatiques

Concernant les paramètres climatiques, de nombreuses mesures sont effectuées. Tout d'abord, le Ctifl a installé une station météo juste à côté des serres pour obtenir des valeurs de température, de rayonnement, d'humidité de l'air et de vitesse du vent les plus précises possibles. Cette station météo est raccordée à l'ordinateur de gestion du climat et de l'irrigation des serres.

A l'intérieur des serres, la gestion du climat et de l'irrigation est assurée par le logiciel Synopta® développé par la société Hortimax. Ce logiciel, installé sur un ordinateur Multima® également développé par Hortimax, permet un suivi précis et régulier de la température, de l'hygrométrie, et de la concentration en CO₂ de l'air dans les serres. Ces données sont mesurées sur place par des sondes ventilées Ektron. Chaque serre contient 4 sondes de ce type à différentes hauteurs pour déterminer les différences de climat entre le haut et le bas de la

serre. Des caméras infra-rouges sont également installées et permettent de déterminer la température des feuilles des tomates.

Des compteurs à calories sont installés et permettent de déterminer la consommation énergétique des différents réseaux de chauffage (rail 51, polyéthylène, forcas) de chaque serre. Des compteurs à eau et un compteur de CO₂ liquide sont également installés. Des compteurs électriques sont également présents pour permettre d'estimer au plus près l'ensemble des dépenses énergétiques des serres.

Analyses statistiques

Les différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R. Une analyse de variance ANOVA est effectuée à travers les étapes suivantes :

- analyse de la normalité des résidus
- analyse de l'indépendance des résidus
- analyse de l'homoscédasticité des résidus
- analyse de la variance des échantillons
- test post-hoc de comparaison de moyennes de Newman-Keuls

Estimations

Toutes les valeurs économiques nécessaires à la réalisation du bilan technico-économique ont été estimées sur la durée totale d'une culture de tomates hors-sol professionnelle de la région nantaise.

Une culture de tomates chez un professionnel se termine classiquement en semaine 47, soit à peu près la troisième semaine de novembre. Toutes les valeurs ont été estimées à partir des données 2014 des professionnels de la région nantaise ou du Ctifl de Carquefou.

Les consommations en calories, en électricité et en eau ont été estimées à partir des données du Ctifl de l'année 2014 auxquelles on a appliqué un ratio. En 2014, la culture de tomates du Ctifl s'étant arrêtée en semaine 42, une projection a été faite pour estimer les valeurs de la fin de la semaine 47 à partir des données des serristes professionnels.

Pour la production, le rendement de la serre témoin a été estimé grâce à la moyenne des rendements finaux des professionnels pour la culture 2014. Les rendements de la serre équipée du système AVS et de la serre semi-fermée ont ensuite été calculés par proportionnalité avec la serre témoin à partir des rendements cumulés à la fin du mois d'août.

Les chiffres d'affaires ont ensuite été estimés à partir des données du cours de la tomate grappe des années précédentes disponibles sur le site du réseau des nouvelles du marché.

IV. Résultats

1. Températures et consommations énergétiques

Températures des serres

Les moyennes des températures des 3 serres sont sensiblement les mêmes sur l'ensemble de la culture. La figure 5 montre cependant que sur la deuxième partie de la culture, les températures moyennes de la serre semi-fermée sont tout le temps supérieures aux deux autres modalités. C'est un effet volontaire car la consigne d'aération en journée de cette serre a été augmentée d'1°C à partir du 26/04.

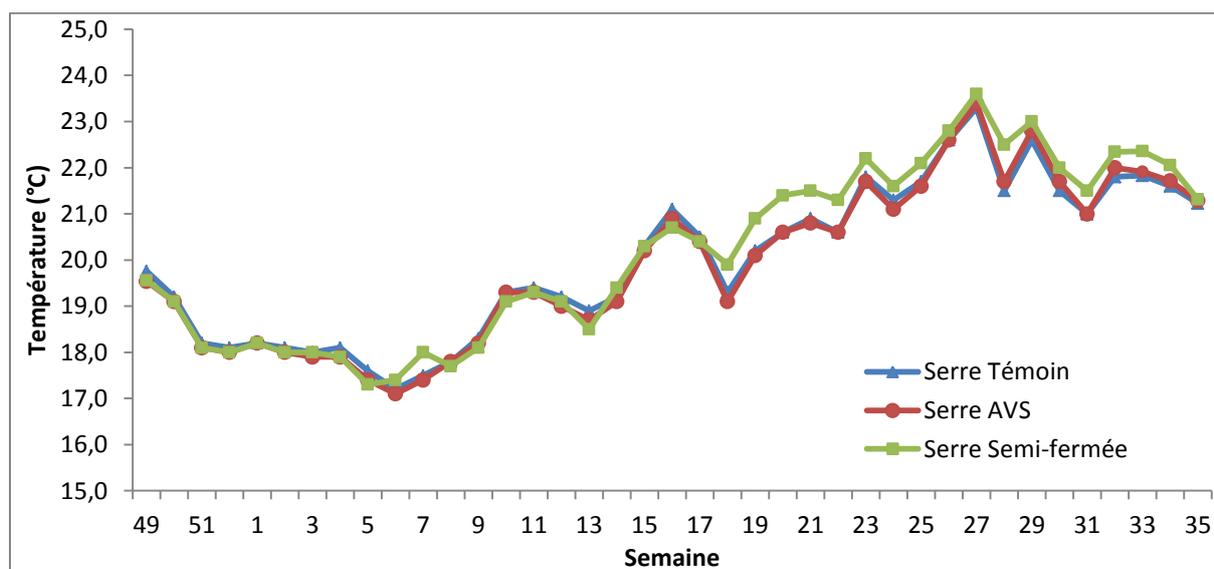


Figure 5 : Moyennes hebdomadaires des températures 24h de serres

En effet, un des objectifs de la serre semi-fermée est de confiner le CO₂ dans le but d'augmenter le calibre des fruits mais cela n'était pas possible en conduisant le climat de la même manière que les deux autres serres. Cette décision a donc été prise pour tenter d'exploiter un peu plus les potentialités de ce type de serre. Cette conduite est possible en grande partie grâce au pad cooling qui permet un contrôle efficace de l'humidité en cas de trop fortes chaleurs et ne pouvait donc pas être appliquée dans les deux autres serres.

Tableau 5 : Comparaison des moyennes de températures des 3 modalités

	Serre témoin		Serre AVS		Serre semi-fermée	
	Du 01/12/14 au 30/05/15	Du 26/04/15 au 30/08/15	Du 01/12/14 au 30/05/15	Du 26/04/15 au 30/08/15	Du 01/12/14 au 30/05/15	Du 26/04/15 au 30/08/15
Moyenne des T° 24h	20,0	21,4	19,9	21,4	20,2	21,9
Moyenne des T° de jour	21,9	23,4	21,9	23,5	22,2	24,0
Moyenne des T° de nuit	17,5	18,0	17,4	17,9	17,9	18,3

Cette modification des consignes a entraîné une augmentation de la moyenne des températures de 0,5°C depuis le 26/04 par rapport au témoin mais n'a pas de réelle incidence sur l'ensemble de la culture comme le montre le tableau 5.

Cette augmentation de 0,5°C s'explique logiquement par l'augmentation des températures de jour en serre semi-fermée dont la moyenne est de 0,6°C supérieure par rapport au témoin depuis le 26/04.

Consommation en gaz

Sur le début de la campagne, la figure 6 montre qu'il y a très peu de différences de chauffage entre les différentes modalités. A partir de la fin février, un écart commence à se creuser entre la serre semi-fermée et les deux autres. Puis, à partir de début avril, la consommation de la serre AVS se réduit et suit la tendance de celle de la serre semi-fermée. Ces écarts de consommation sont amplifiés au fur et à mesure de la culture à cause des stratégies de chauffage différentes qui ont été mises en place. La température maximum des réseaux de chauffage en serre semi-fermée a toujours été maintenue à 45°C tandis que celle des deux autres serres a été définie à 60°C en début de campagne. Cependant, à partir du 31/03, le maximum de la serre AVS a été abaissé à 45°C ce qui explique l'écart observé par rapport à la serre témoin à partir de cette date. Les écarts observés avec le témoin sont amplifiés quand le rayonnement est plus élevé.



Figure 6: Consommation de gaz cumulée des différentes modalités et rayonnement

La serre témoin a donc une consommation en gaz nettement supérieure aux deux autres. Jusqu'à la fin du mois d'août, les stratégies mises en place ont permis une économie de plus de 13% pour la serre AVS et de plus de 16% pour la serre semi-fermée par rapport au témoin comme le montre le tableau 6.

Tableau 6: Comparaison de la consommation en gaz des différentes modalités par rapport à la serre témoin

Serres	Consommation de gaz en fin de semaine 35 (kWh/m ²)	Témoin base 100
Témoin	298	100
AVS	259	86,9
Semi-fermée	249	83,6

Consommation électrique

La figure 7 permet d'observer que, concernant la consommation électrique, les tendances s'inversent. C'est la serre témoin qui est, et de loin, la plus économe en électricité. En effet, les systèmes de ventilation permettant d'avoir une meilleure maîtrise du climat sont actifs quasiment en permanence pendant la journée ce qui entraîne immédiatement des consommations électriques élevées.

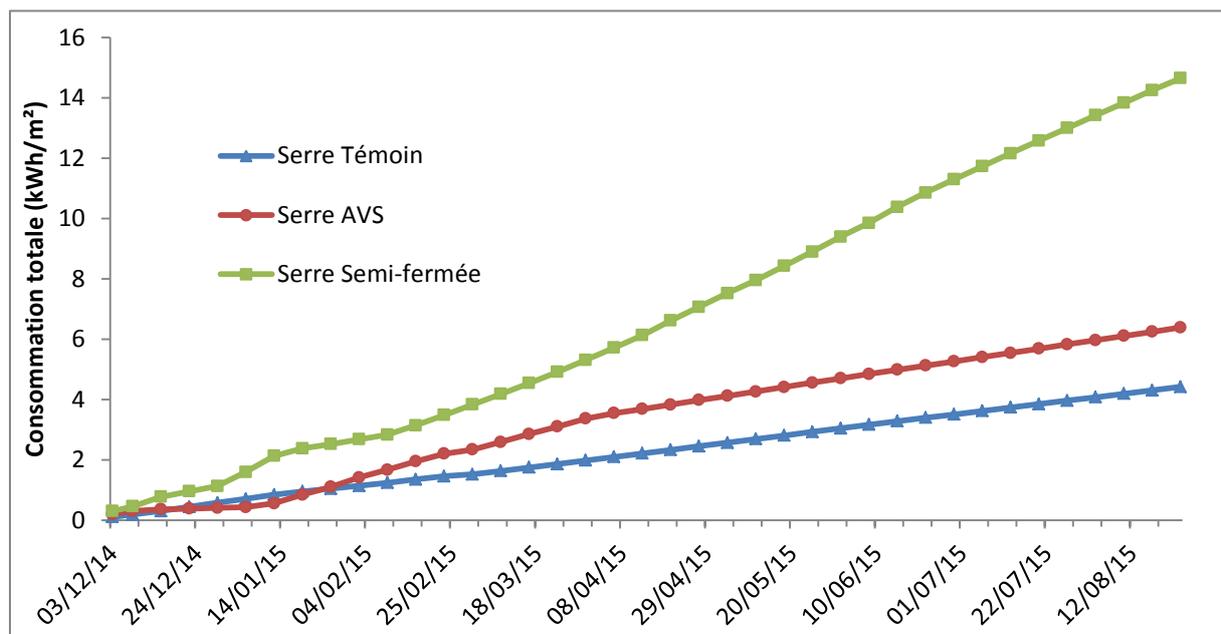


Figure 7 : Consommation électrique cumulée des différentes modalités

Jusqu'à la fin du mois d'août, la serre AVS a consommé près de 50% d'électricité de plus que la serre témoin. De son côté, la serre semi-fermée en est à 130% de plus comme le montre le tableau 7.

Tableau 7 : Comparaison de la consommation électrique des différentes modalités par rapport à la serre témoin

Serres	Consommation électrique en fin de semaine 35(kWh/m ²)	Témoin base 100
Témoin	4,4	100
AVS	6,4	145,5
Semi-fermée	14,6	331,8

2. Développement des plantes

Croissance

Concernant la croissance des plantes, visible sur la figure 8, la différence entre la serre semi-fermée et les deux autres est une nouvelle fois significative.

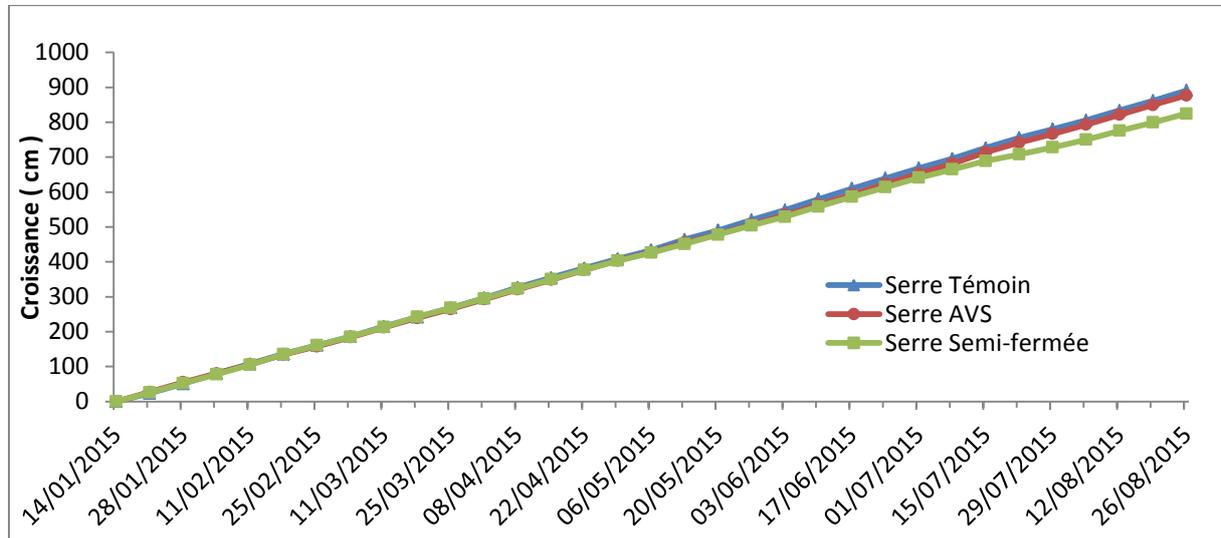


Figure 8 : Croissance hebdomadaire cumulée au 30 août

Les postulats de normalité et d'homoscédasticité des résidus sont vérifiés avec des p-valeurs respectives de 0,527 et 0,696. Les résultats de l'ANOVA et du test de Newman-Keuls se trouvent dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8 : ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif de la croissance cumulée au 30 août

	Df	Sum squares	Mean squares	F value	Pr(>F)
Serres	2	29314	14657	20,468	$9,52 \cdot 10^{-6}$
Bloc	11	5676	516	0,721	0,708
Residuals	22	15754	716		

Tableau 9 : Test de Newman-Keuls de l'ANOVA de la croissance cumulée au 30 août

Serres	Moyenne	Groupe
Témoins	891	A
AVS	876,9	A
Semi-fermée	824,7	B

La serre semi-fermée présente des plantes avec une croissance plus faible surtout sur la fin de la campagne. Ainsi, au 30 août, la moyenne de croissance des plantes en serre semi-fermée est de 66 cm de moins qu'en serre témoin. Cette faible croissance s'explique par 3 principales raisons.

Tout d'abord, le taux de brassage d'air très supérieur permet une activation des plantes en réduisant la couche limite sur les feuilles. Ceci permet à la feuille d'améliorer ses échanges gazeux et va induire des plantes plus génératives. Ensuite, l'écart de température jour-nuit est légèrement supérieur en serre semi-fermée ce qui réduit la taille des entre-nœuds et donc la croissance de la plante. Enfin, des écrans d'ombrage ont été déployés dans les serres témoin et

AVS lors d'épisodes de hautes températures tandis que cela n'a pas été utile en serre semi-fermée grâce à l'utilisation du pad cooling. Cela influe sur le rayonnement direct reçu par les plantes.

Ces 3 facteurs ont donc joué un rôle en augmentant la générativité des plantes en serre semi-fermée et ont limité son développement végétatif.

Stades de floraison et de récolte

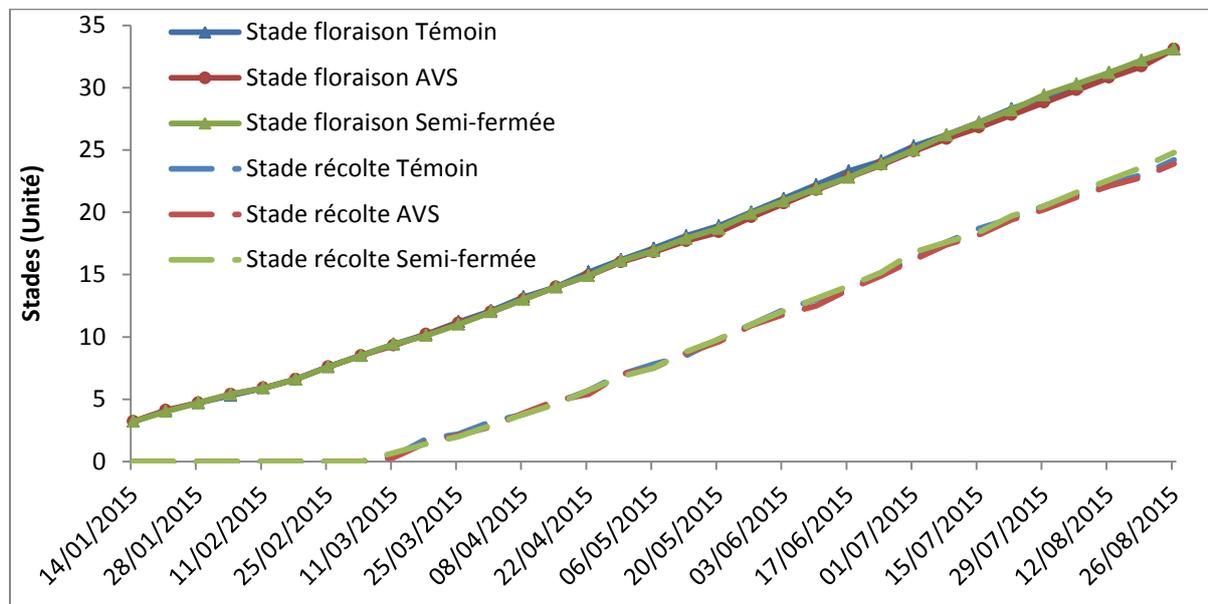


Figure 9 : Evolution des stades de floraison et de récolte

La figure 9 montre que les stades de floraison et de récolte évoluent à la même vitesse dans les trois modalités. Les vitesses de floraison et de décharge des fruits sont en légère augmentation sur toute la durée de la culture. Quand il faut 11 semaines entre la floraison et la récolte d'un bouquet en mars, il n'en faut plus que 8 en août (Annexe III).

Distance fleur-apex

La distance entre l'apex de la plante et le premier bouquet en fleurs donne une assez bonne idée de la situation de la plante : plus cette distance est grande et plus cela signifie que la plante est végétative.

La figure 10 permet d'observer que dans la première partie de la culture, cette distance est assez grande. C'est tout à fait logique car cela correspond à la période où la plante ne produit pas encore. A ce moment-là, on cherche donc à favoriser le développement végétatif de la plante pour qu'elle puisse faire des réserves avant d'entrer en production. Une fois cette étape passée, la distance fleur-apex diminue progressivement jusqu'à se stabiliser autour de 20 cm. On remarque que la serre semi-fermée présente des moyennes légèrement plus basses que les deux autres serres. Etant plus générative, cela reste parfaitement logique.

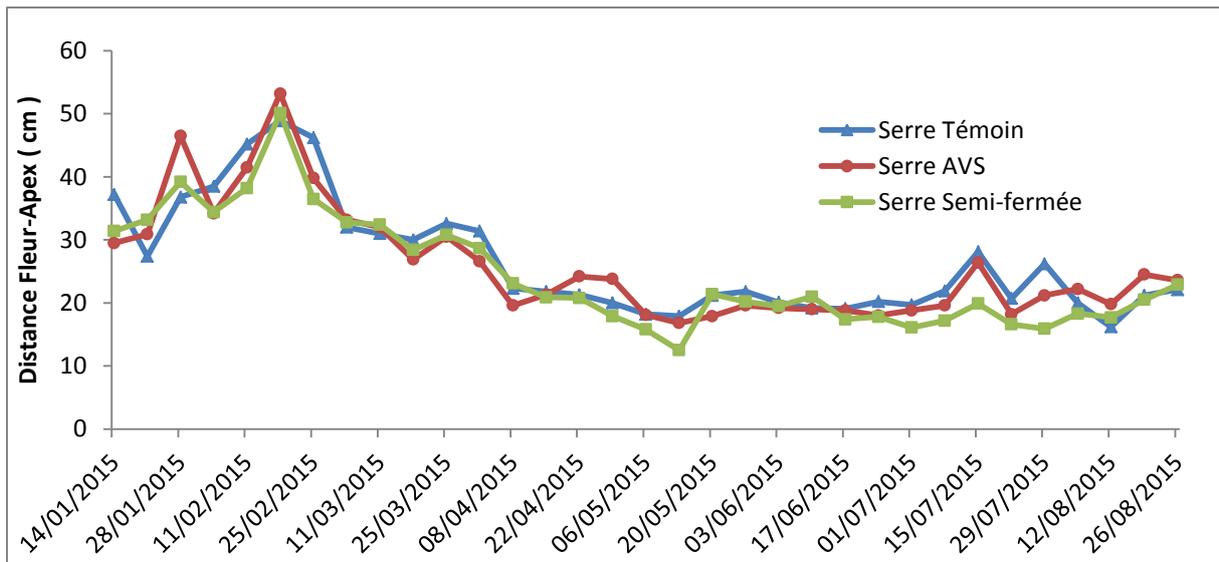


Figure 10 : Evolution de la distance entre l'apex et la première fleur

Diamètre de tige

Sur la figure 11, on constate que le diamètre de tige des plantes est sensiblement le même dans les différentes modalités. La vigueur en tête des plantes n'est donc pas influencée par les trois conduites climatiques étudiées.

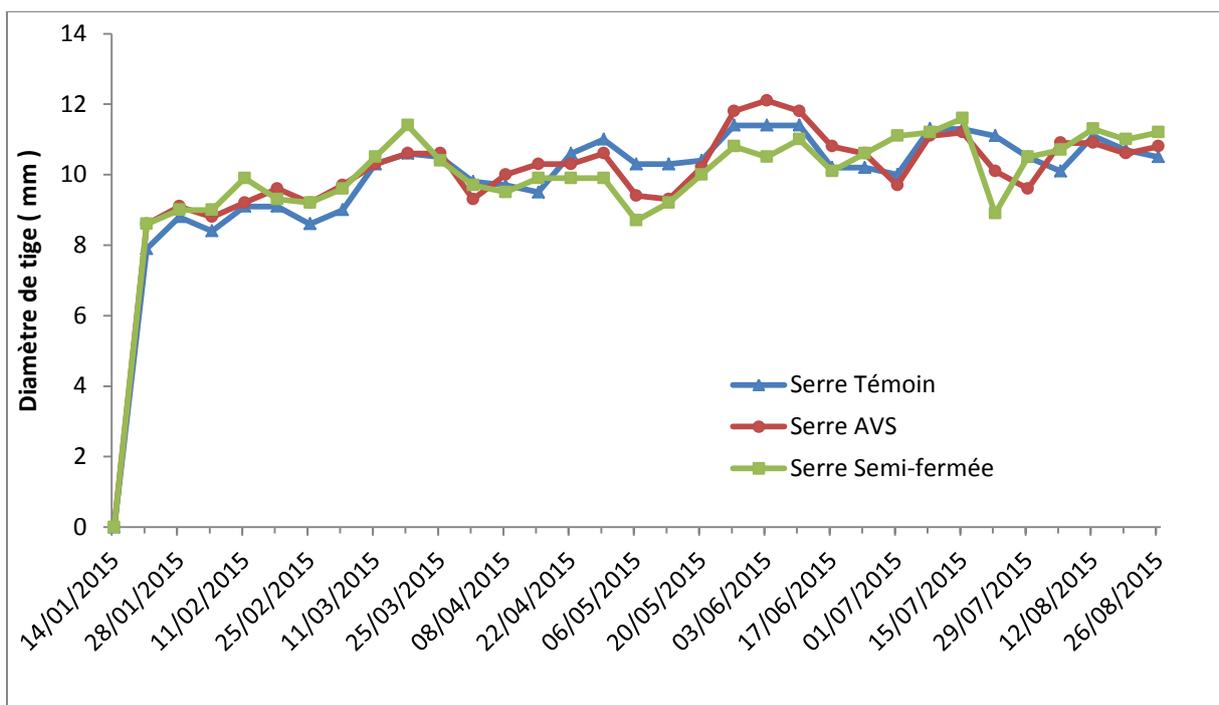


Figure 11 : Evolution du diamètre de tige moyen

Dans un premier temps, on a une augmentation extrêmement rapide qui correspond simplement à la croissance de la plante en développement. Ensuite, sur le reste de la période de culture, on voit que le diamètre de tige augmente et diminue tout à tour mais on a dans l'ensemble une légère et constante augmentation.

Ces variations du diamètre de tige s'expliquent facilement. En effet, si on met en relation ce paramètre avec le nombre de fruits présents sur la plante, on remarque que lorsque l'une des

valeurs augmente, l'autre diminue (Annexe IV). Ces variations sont donc liées à des pics de production des plantes.

Ceci signifie que les plantes sont bien équilibrées car elles ont un développement végétatif et une production de fruits qui se compensent avec toujours un léger avantage pour l'un ou l'autre.

Nombre de fruits présents sur les plantes

Le nombre de fruits par m² augmente pendant une bonne partie de la culture avant d'atteindre son maximum entre 120 et 130 fruits/m² selon les modalités, puis diminue progressivement. Cette évolution est visible sur la figure 12.

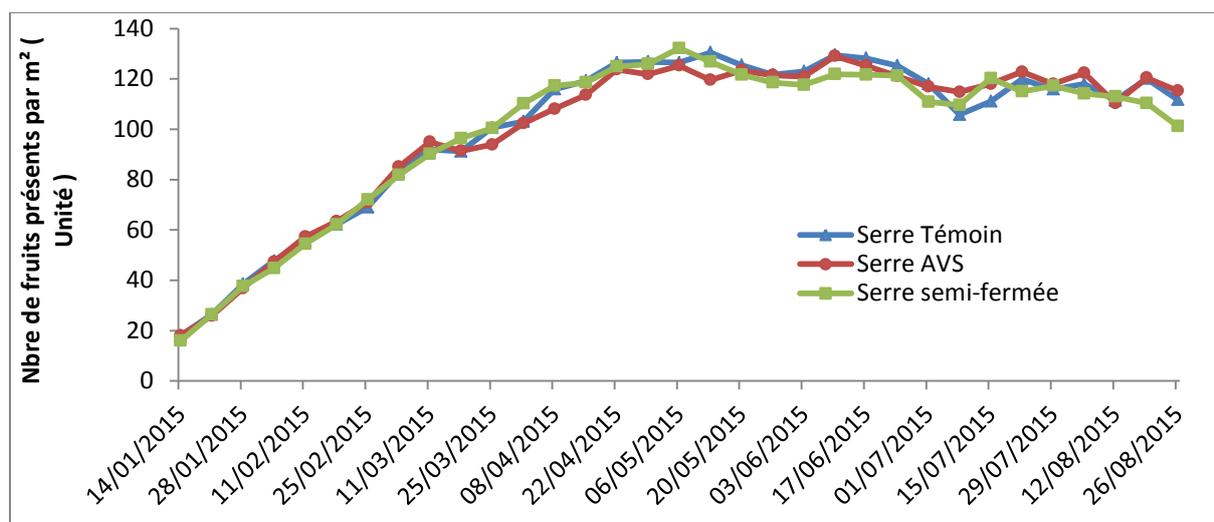


Figure 12 : Nombre de fruits par m² de culture

Dans la première partie de la culture, le nombre de fruits sur les plantes augmente car la plante grandit et développe ses premiers fruits sans que ceux-ci ne soient encore assez mûrs pour être récoltés. Le 11 mars, on voit un léger ralentissement dû à la première récolte. Cependant, le nombre de fruits au m² continue d'augmenter car les extra-bras mis en place pour augmenter la densité n'ont pas encore atteints leur première récolte. Les extra-bras ayant été développés sous le 6^e bouquet, ils sont donc récoltés pour la première fois en même temps que celui-ci, soit le 29 avril.

Ensuite, dans la deuxième partie de la culture, avec la réduction progressive du délai entre la floraison et la récolte sur les bouquets, le nombre de fruits présents sur les plantes diminue doucement lui aussi.

Indice de surface foliaire (LAI)

La figure 13 présente le LAI des trois modalités estimé pour 18 feuilles. Cela signifie que ce n'est pas le LAI réel qui est ici présenté, mais bien le LAI qui aurait été constaté si les plantes avaient toutes eu 18 feuilles. Le LAI réel est très difficile à comparer entre les serres en raison de l'état d'avancement de l'effeuillage au moment de la notation, de problèmes de feuilles cassées, etc.

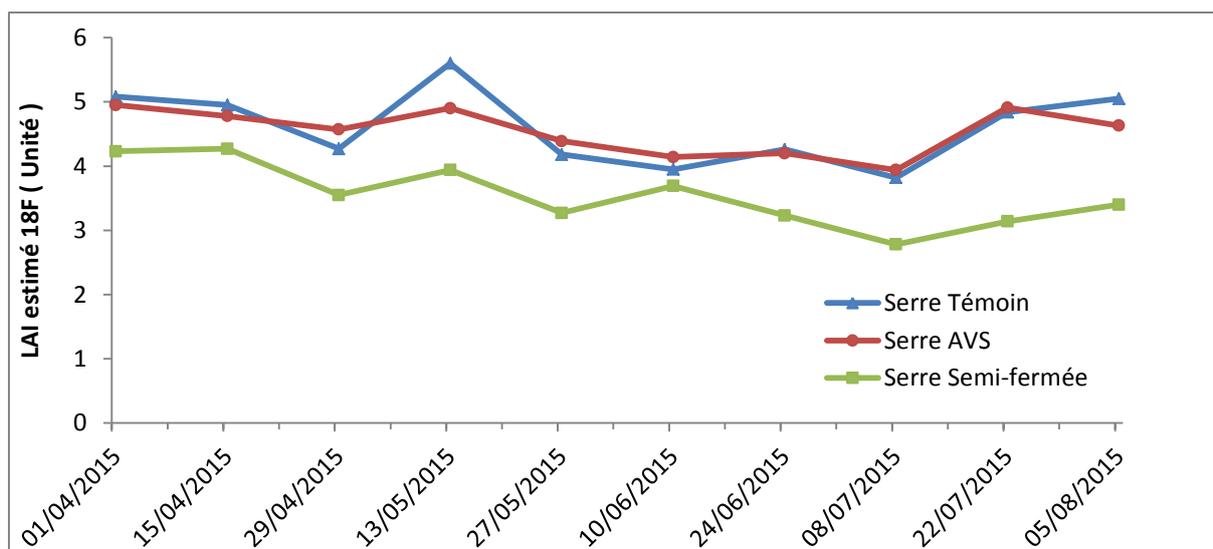


Figure 13 : Evolution du LAI estimé pour 18 feuilles

Au vu des courbes, on constate que les LAI des serres témoin et AVS sont sensiblement les mêmes tandis que celui de la serre semi-fermée est beaucoup plus faible. C'est d'ailleurs le seul qui se retrouve en-dessous de 4 contrairement aux deux autres qui se maintiennent toujours au-dessus. Cette valeur de 4 m² de feuilles par m² de sol est la valeur optimale d'après la littérature (Heuvelink, 2005). Cela signifie, en théorie, qu'il serait encore possible d'augmenter la surface foliaire des plantes en serre semi-fermée pour optimiser un peu plus le rendement. En revanche, dans les deux autres serres, le LAI est légèrement trop élevé ce qui signifie que les plantes sont légèrement trop végétatives. Les valeurs restent néanmoins très raisonnables.

Le LAI plus faible de la serre semi-fermée est la résultante d'un taux de brassage plus élevé dans cette modalité.

En effeuillant moins, on s'assure de conserver une certaine humidité dans la serre car ce sont les feuilles qui transpirent. Plus la surface foliaire des plantes est élevée, et plus elles transpireront. Les serres témoin et AVS ne possédant pas de système d'humidification tel que le pad cooling, il faut être plus prudent sur l'effeuillage ce qui peut avoir une incidence sur le LAI.

3. Production

Rendement commercialisable total

Concernant le rendement, la figure 14 montre qu'il y a un très net avantage pour la serre semi-fermée par rapport aux deux autres. Après 25 semaines de récolte, soit le 30 août, la serre semi-fermée obtient un rendement supérieur de plus de 3,5 kg/m² par rapport à la serre témoin. Le tableau 10 permet de constater que l'efficacité énergétique de la serre semi-fermée est de 30% supérieure à celle de la serre témoin.

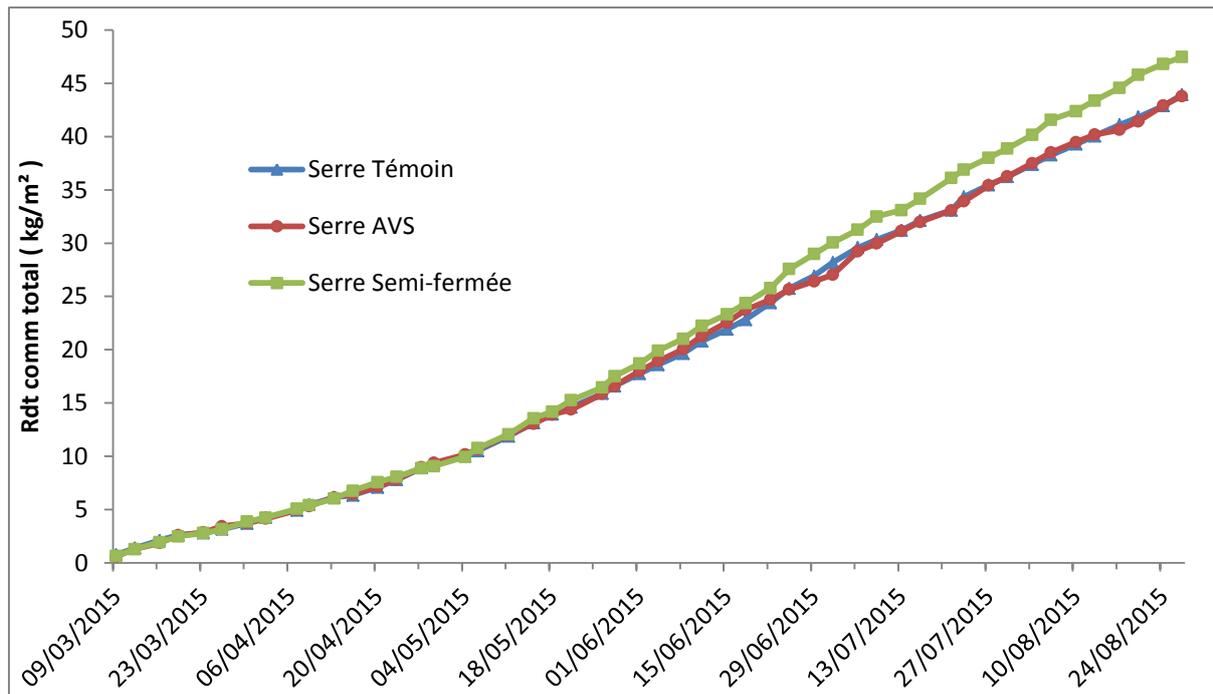


Figure 14: Rendement commercialisable total cumulé jusqu'au 31 août

Tableau 10 : Rendement après 25 semaines de récolte

	Rendement cumulé fin de semaine 35 (kg/m ²)	Consommation de gaz cumulée fin de semaine 35 (kWh/m ²)	Efficience énergétique (kg/kWh)
Serre Témoin	43,92	298	0,147
Serre AVS	43,79	259	0,169
Serre Semi-fermée	47,46	249	0,191

Ces différences de rendement sont statistiquement différentes d'après le test ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif ci-dessous dans les tableaux 11, 12 et 13.

Tableau 11 : Vérification des postulats de l'ANOVA du rendement cumulé

	Statistique	P-valeur
Normalité des résidus (Shapiro-Wilk)	0,938	0,267
Homoscédasticité des résidus (Bartlett)	0,634	0,728

Le test de Shapiro-Wilk pose l'hypothèse nulle que les échantillons suivent une loi normale. Le test de Bartlett pose l'hypothèse nulle que les variances des échantillons sont identiques. Les P-valeurs sont toutes les deux supérieures à 0,05 : on ne peut donc rejeter aucune des deux hypothèses nulles au risque de 5%. Les postulats sont donc vérifiés et on peut effectuer l'ANOVA.

Tableau 12 : ANOVA à 2 facteurs avec modèle additif du rendement cumulé

	Df	Sum Squares	Mean Squares	F value	Pr(>F)
Serres	2	52,21	26,105	14,519	0,0011
Bloc	5	21,273	4,255	2,366	0,115
Residuals	10	17,98	1,798		

D'après le tableau 12, il n'y a pas d'effet bloc sur le rendement mais le type de serre a bien un impact significatif sur le rendement cumulé obtenu. Le test post-hoc du tableau 13 permet de réaliser des groupes d'échantillons :

Tableau 13 : Test de Newman-Keuls de l'ANOVA du rendement cumulé

Serres	Nombre d'observations	Moyenne	Groupe
Semi-fermée	6	47,464	A
Témoin	6	43,916	B
AVS	6	43,789	B

La serre semi-fermée a donc une production significativement plus élevée que les deux autres serres qui sont, elles, classées dans le même groupe.

La serre semi-fermée se démarque pour la première fois des autres à la fin du mois de mai et la différence n'a fait que s'accroître après cette date. Cette première démarcation correspond à la récolte des premiers bouquets qui ont profité de la hausse de la consigne d'aération de +1°C. L'avantage de la serre semi-fermée est donc avéré sous un climat chaud. L'humidité étant plus facile à gérer, il est aisé de se permettre d'augmenter la température de cette serre qui va être valorisée en partie par le rayonnement, qui est également supérieur dans une serre semi-fermée grâce à un nombre d'ouvrants plus faible et l'absence d'utilisation d'écran d'ombrage.

En regardant plus précisément la figure 14, la courbe montre que la serre semi-fermée prend un avantage certain au niveau de la production dès le 13 avril. La semaine 15, débutant le 6 avril 2015, correspond au début des premières semaines avec de forts rayonnements. La serre 3 valorisant mieux le rayonnement, on remarque tout de suite un impact sur le rendement. Cependant, cette hausse du rayonnement a également provoqué une hausse de la température dans les serres. La ventilation et l'humidification des serres a donc dû être adaptée pour maintenir un climat optimal dans chacune des serres. La serre semi-fermée a été gérée grâce au pad cooling qui permet un contrôle très rapide et précis de la température et de l'humidité dans la serre. Malheureusement, cet outil a été utilisé un peu trop fortement. Les quantités d'eau apportées sur le pad cooling ont été trop importantes ce qui a induit un renouvellement d'air trop froid dans la serre (Annexe V). Les gaines de ventilation étant situées juste en-dessous des bouquets en maturation, les fruits ont subi cet air froid de plein fouet ce qui explique la baisse de rendement de la serre semi-fermée sur cette période. De plus, la légère hausse d'humidité dans la serre a limité un peu l'activité des plantes qui sont devenues moins génératives. Il aurait fallu réduire la quantité d'eau apportée par les vannes sur le pad cooling pour renouveler l'air sur une durée plus longue mais avec des températures plus élevées.

Calibre

La figure 15 montre que d'une manière générale, le calibre des fruits des 3 modalités est en augmentation sur l'ensemble de la saison.



Figure 15 : Calibre moyen des fruits commercialisables par date de récolte

D'après le tableau 14, la serre témoin possède une moyenne de calibre plus faible que les deux autres serres. Cependant, la serre Témoin et la serre équipée de l'AVS ont un rendement égal sur la durée totale de la culture, constaté sur le tableau 10. On peut donc en déduire que le calibre élevé en serre AVS est contrebalancé par un nombre de fruits commercialisables plus faible. C'est d'ailleurs dans la serre AVS que le nombre de déchets est le plus important.

Tableau 14 : Poids moyen des fruits et nombre de déchets

	Serre Témoin	Serre AVS	Serre Semi-fermée
Moyenne du calibre de Mars 2015	104	111	111
Moyenne du calibre de Juillet 2015	138	144	146
Moyenne du calibre sur toute la culture	121	126	127
Nombre de fruits commercialisables récoltés/m ² au 30 août	357	341	366
Nombre de déchets/m ² au 30 août	9	14	12

4. Bilan économique

Coûts

Pour le chauffage, les estimations ont été réalisées à partir des données de calories consommées en 2014 par la serre témoin du centre Ctifl de Carquefou. Le tableau 15 montre que les consommations totales de chauffage en serre témoin pour les années 2014 et 2015 sont sensiblement les mêmes. Etant légèrement plus faibles en 2015, un coefficient de 0,99, correspondant à la différence de consommation constatée en semaine 35 entre les deux années, a été appliqué pour refléter au mieux la réalité.

Tableau 15 : Estimation de la consommation en gaz 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47

	Consommation totale gaz 2014 en semaine 35 (kWh/m ²)	Consommation totale gaz 2015 en semaine 35 (kWh/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale gaz 2014 (kWh/m ²)	Consommation totale gaz 2015 estimée (kWh/m ²)
Serre Témoin	299	298	0,99	351	347

Les consommations totales 2015 estimée des serres AVS et semi-fermée ont ensuite été estimées dans le tableau 16 à partir de la différence observée à la fin de la semaine 35 par rapport à la serre témoin.

Tableau 16: Estimations des consommations en gaz des différentes modalités jusqu'en semaine 47

Serres	Consommation totale gaz 2015 en semaine 35	Coefficient calculé	Consommation totale gaz 2015 estimée (kWh/m ²)
Témoin	298	1	347
AVS	259	0,87	302
Semi-fermée	249	0,84	291

La serre témoin sera donc celle qui consommera le plus de gaz sur l'ensemble de la culture avec près de 350 kWh/m² contre moins de 300 pour la serre semi-fermée.

Pour les consommations électriques, la même méthode a été effectuée. Les résultats se trouvent dans les tableaux 17 et 18.

Tableau 17 : Estimation de la consommation en électricité 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47

	Consommation totale électricité 2014 en semaine 35 (kWh/m ²)	Consommation totale électricité 2015 en semaine 35 (kWh/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale électricité 2014 (kWh/m ²)	Consommation totale électricité 2015 estimée (kWh/m ²)
Serre Témoin	4,2	4,4	1,06	5,7	6,0

Tableau 18 : Estimations des consommations en électricité des différentes modalités jusqu'en semaine 47

Serres	Consommation totale électricité 2015 en semaine 35 (kWh/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale électricité 2015 estimée (kWh/m ²)
Témoin	4,4	1	6,0
AVS	6,4	1,45	8,7
Semi-fermée	14,6	3,31	19,9

C'est logiquement que la serre semi-fermée arrivera à une consommation électrique plus de deux fois supérieure à la serre AVS et plus de trois fois supérieure au témoin.

Pour les consommations en eau, soit l'irrigation dans les 3 serres plus le pad cooling de la serre semi-fermée, les estimations se trouvent dans les tableaux 19 et 20.

Tableau 19 : Estimation de la consommation en eau 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47

	Consommation totale eau 2014 en semaine 35 (l/m ²)	Consommation totale eau 2015 en semaine 35 (l/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale eau 2014 (l/m ²)	Consommation totale eau 2015 estimée (l/m ²)
Serre Témoin	771,6	799,1	1,04	991,4	1027

Tableau 20 : Estimations des consommations en eau des différentes modalités jusqu'en semaine 47

Serres		Consommation totale eau 2015 en semaine 35 (l/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale eau 2015 estimée (l/m ²)
Témoin		799,1	1	1027
AVS		759,4	0,95	976
Semi-fermée	Irrigation	778,6	0,97	1000
	Pad cooling	95,3	0,12	122

La serre semi-fermée est celle qui devrait consommer le plus d'eau à cause de son système de pad cooling qui nécessite de l'eau potable.

Les coûts d'engrais ont été calculés à partir des consommations en eau par les plantes d'après les valeurs avancées par Moumouni dans son étude (MOUMOUNI, 2012). Le prix de l'engrais calculé de cette manière se trouve ci-dessous.

$$\text{Prix engrais} = \frac{363\,000 - 145\,200}{(255\,000 - 89\,450) \times 1000} = 0,0013 \text{ € par litre d'eau consommé}$$

Les estimations des consommations en CO₂ liquide ont été calculées à partir des consommations de l'année 2014. Les valeurs se retrouvent dans les tableaux 21 et 22.

Tableau 21 : Estimation de la consommation en CO₂ liquide 2015 totale pour la serre témoin jusqu'en semaine 47

Serres	Consommation totale CO ₂ 2014 en semaine 35 (kg/m ²)	Consommation totale CO ₂ 2015 en semaine 35 (kg/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale CO ₂ 2014 (kg/m ²)	Consommation totale CO ₂ 2015 estimée (kg/m ²)
Témoin	6,0	8,6	1,43	6,5	9,3

Tableau 22 : Estimations des consommations en CO₂ liquide des différentes modalités jusqu'en semaine 47

Serres	Consommation totale CO ₂ 2015 en semaine 35 (kg/m ²)	Coefficient calculé	Consommation totale CO ₂ 2015 estimée (kg/m ²)
Témoin	8,6	1	9,3
AVS	8,7	1,01	9,4
Semi-fermée	8,7	1,01	9,4

Les consommations de CO₂ liquide seront donc globalement les mêmes quelle que soit la modalité.

Concernant les coûts de main-d'œuvre, les temps de travaux sont les mêmes quel que soit le type de serre sauf en ce qui concerne le palissage. Les plantes de la serre semi-fermée grandissant significativement moins sur l'ensemble de la culture, il y aura moins de passages à faire pour le palissage. Dans notre cas, la croissance de la serre semi-fermée est inférieure d'environ 50 cm ce qui représente deux semaines de croissance en moins, donc deux passages de palissage en moins. D'après Vitre, le temps moyen de palissage par enroulage sur une année est d'environ 30 heures par hectare (VITRE, 2003). En considérant le salaire d'un ouvrier au SMIC, l'économie de deux passages de palissage sur une année est tellement négligeable que cette valeur ne sera pas retenue pour effectuer le bilan technico-économique.

Les prix des kWh pour l'électricité et le gaz ainsi que le prix du m³ d'eau maraîchère, d'eau potable et le prix du kg de CO₂ utilisés dans les calculs suivants sont les prix inscrits sur les factures payées par le Ctifl de Carquefou soit :

- Prix moyen du kWh électrique : 0,0625 € HT
- Prix du kWh de gaz : 0,0361 € HT
- Prix du m³ d'eau maraîchère : 0,213 € HT
- Prix du m³ d'eau potable : 2,530 € HT
- Prix du kg de CO₂ liquide : 0,235 € HT

Tableau 23 : Résumé des coûts de fonctionnement présentant une différence entre les modalités

Serres	Témoin	AVS	Semi-fermée
Consommation totale gaz (kWh/m ²)	347	302	291
Prix total gaz (€/m ²)	12,52	10,90	10,51
Consommation totale électricité (kWh/m ²)	6,0	8,7	19,8
Prix total électricité (€/m ²)	0,38	0,54	1,24
Consommation totale irrigation (l/m ²)	1027	976	1000
Consommation totale pad cooling (l/m ²)	-	-	122
Prix total eau (€/m ²)	0,219	0,208	0,523
Prix total engrais (€/m ²)	1,34	1,27	1,30
Consommation totale CO ₂ liquide (kg/m ²)	9,3	9,4	9,4
Prix total CO ₂ liquide (€/m ²)	2,18	2,23	2,21
Total (€/m²)	16,64	15,13	15,78
Différence de coût par rapport au témoin (€/m²)	0,00	-1,51	-0,86

Le tableau 23 montre que la serre témoin coûte plus de deux euros de plus au m² que la serre semi-fermée en terme de chauffage mais près d'un euro de moins par rapport aux consommations électriques. La différence de consommation d'eau en serre semi-fermée est uniquement due au pad cooling. Cela se ressent sur le prix total de l'eau car il faut utiliser de l'eau potable pour ne pas risquer de salir le système. Au final, la serre témoin est celle qui fait réaliser le plus de dépenses et c'est uniquement à cause de sa consommation en gaz, c'est-à-dire du chauffage. Les serres AVS et semi-fermée présentent un réel avantage sur les coûts de fonctionnement par rapport au témoin avec des économies respectives de 1,51€/m² et 0,86€/m².

Chiffre d'affaires

Pour pouvoir estimer le chiffre d'affaires brut qui sera réalisé à la fin de la semaine 47, il a d'abord fallu estimer les rendements qui seraient réalisés à la même date. Les prévisions ont donc été calculées à partir des rendements moyens des cultures des professionnels sur l'année 2014 comme précisé plus haut. Cependant, pour la serre semi-fermée, un ajustement a dû être effectué pour que tous les rendements soient comparables d'un point de vue économique.

En effet, la serre semi-fermée fonctionne grâce à un corridor 1,78 m de largeur sur un des côtés de la serre. Pour un producteur, cette perte de surface représente donc une perte de rendement. La longueur classique d'une gouttière de culture chez un professionnel est de 80

mètres de long. La perte de rendement due à la surface occupée par le corridor est donc de l'ordre de $1,78/81,78 = 2,18\%$ sur la surface totale d'une serre.

Tableau 24 : Calcul de la moyenne du pourcentage du rendement total de la culture 2014 atteint en semaine 35 par les serristes professionnels nantais

	Moyenne serres professionnelles de la région nantaise
Rendement 2014 fin de semaine 35 (kg/m ²)	43
Rendement 2014 fin de semaine 47 (kg/m ²)	58
Pourcentage du rendement total de la culture 2014 atteint en semaine 35 (%)	74

D'après le résultat du tableau 24, on peut considérer qu'en semaine 35 de l'année 2015, la serre témoin a produit 74% de son rendement total de l'année ce qui permet de l'estimer dans le tableau 25.

Tableau 25 : Estimation des rendements cumulés fin de semaine 47 pour l'année 2015

Serres	Témoin	AVS	Semi-fermée
Rendement 2015 fin de semaine 35 (kg/m ²)	43,9	43,8	46,4 ²
Pourcentage du rendement de la serre témoin en semaine 35 (%)	1	0,997	1,057
Rendement 2015 estimé en fin de semaine 47 (kg/m ²)	59,00 ¹	58,80	62,40 ²

¹ Valeur arrondie du fait de l'imprécision de l'estimation

² Rendement prenant en compte la perte de surface due à la présence du corridor

Le cours de la tomate est assez variable sur une année. Pour estimer le chiffre d'affaires brut réalisé par un producteur avec les trois types de serres testés, la moyenne hebdomadaire des prix d'expédition des années précédentes (2012 à 2014) a été utilisée.

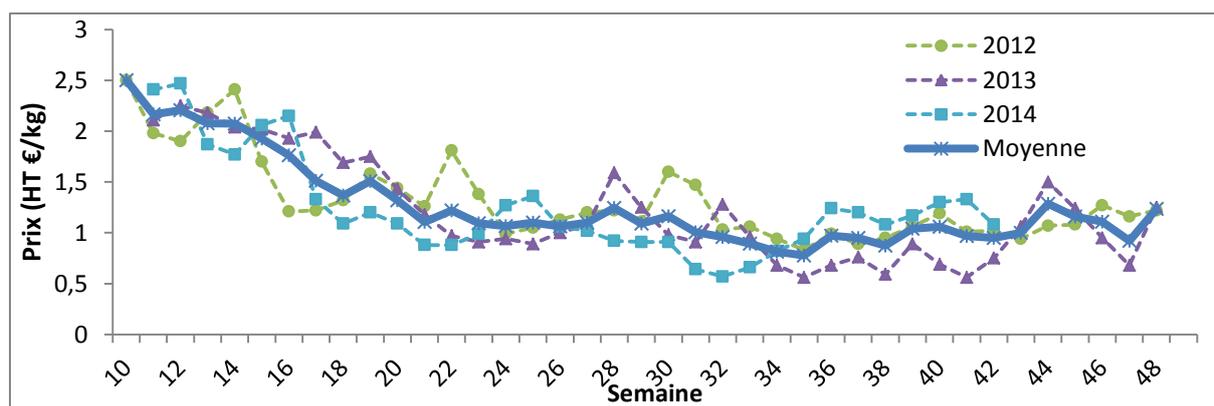


Figure 16 : Prix d'expédition hors taxe de la tomate des années précédentes

La figure 16 nous montre l'évolution des prix d'expédition hors taxe de la tomate grappe en région nantaise au cours de l'année.

Les prévisions de rendements finaux comme des chiffres d'affaires finaux sont donc en faveur la serre semi-fermée comme le montre le tableau 26.

Tableau 26 : Estimation des chiffres d'affaires cumulés en fin de semaine 47

Serres	Témoin	AVS	Semi-fermée
Estimation du rendement final (kg/m ²)	59,00	58,80	62,40
Estimation du CA final (€/m ²)	67,75	67,52	72,24
Différence de CA par rapport à la serre témoin (€/m ²)	0	-0,23	4,49

Bilan

En additionnant ces coûts de fonctionnement estimés avec ces chiffres d'affaires prévisionnels, on obtient une valeur qui ne reflète pas le gain qu'un producteur réaliserait à la fin de sa culture puisque les coûts de main d'œuvre n'ont pas été pris en compte. En revanche, la différence entre ces valeurs représente un gain pour un producteur. Il faut donc regarder si cette différence est positive ou négative par rapport à la serre témoin pour savoir si ces équipements sont rentables.

Tableau 27 : Comparaison des gains estimés par rapport à la serre témoin

	AVS	Semi-fermée
Différence de coût de fonctionnement par rapport à la serre témoin (€/m ²)	-1,51	-0,86
Différence de chiffre d'affaires par rapport à la serre témoin (€/m ²)	-0,23	4,49
Gain par rapport à la serre témoin	1,28	5,35

Pour la saison 2015, les estimations effectuées dans le tableau 27 prévoient un bénéfice brut d'environ 1,30 €/m² pour la serre AVS par rapport à la serre témoin. Cependant, on sait que cette serre coûte 10 €/m² de plus à l'achat que la serre témoin. Cela signifie donc qu'il faudrait compter 8 ans avant de rentabiliser cet investissement et commencer à faire des bénéfices avec une serre équipée d'un système AVS.

La serre semi-fermée pour sa part, pourrait permettre de réaliser un bénéfice brut d'environ 5,30 €/m²/an par rapport à la serre témoin. Sachant qu'à l'achat il faut compter 30 €/m² supplémentaires, on peut amortir l'investissement de départ en moins de 6 ans.

La durée de vie d'une serre verre est très variable mais on peut raisonnablement considérer qu'elle peut être utilisée pendant une quinzaine d'années en restant efficace et relativement compétitive par rapport aux nouveaux matériels développés pendant cette période. Sur cette base, un retour sur investissement de 8 ans paraît quand même plutôt long et donc peu intéressant pour un producteur. De plus, une fois l'investissement amorti, le gain annuel potentiel avec un système AVS reste assez faible même si cela suffit à faire la différence. En revanche, un amortissement sur 5 ans suivi d'un bénéfice brut de plus de 5 €/m²/an semble potentiellement très intéressant.

V. Discussion

Au vu du bilan économique, il semble qu'une serre équipée d'un système AVS soit moins intéressante. Cependant, ces dernières années, de plus en plus de serristes de la région nantaise s'équipent de ce type de matériel. Un système de ventilation active permet une

gestion du taux d'humidité beaucoup plus fine et rapide que dans une serre normale. Sachant qu'une hygrométrie trop importante est due à une transpiration des plantes trop importante, le déficit hydrique d'une serre est directement dépendant de l'état en végétation des plantes et de la conduite de l'effeuillage. Au cours de la culture 2015, l'équipe d'ouvriers du Ctifl a été efficace et n'a connu que très peu de retard dans la réalisation de l'effeuillage hebdomadaire. Chez les producteurs, un retard d'effeuillage peut rapidement survenir à cause de périodes très chargées et/ou de problèmes de main d'œuvre. De plus, beaucoup de producteurs installent des systèmes de cogénération. Ceci leur permet de vendre l'électricité en s'engageant à consommer une certaine quantité de gaz. De ce fait, ils ont facilement tendance à surconsommer en chauffage car cela ne leur fait pas perdre d'argent. Cet excès de chauffage fait transpirer les plantes ce qui diminue le DH et va donc mettre les plantes dans un état végétatif. Dans ce cas, un système AVS peut éventuellement devenir intéressant pour favoriser l'activité des plantes en augmentant le VPD feuille-air. En revanche, si la conduite de l'effeuillage est régulière et que le chauffage est modéré, les plantes seront bien équilibrées et le DH mieux maîtrisé. Dans ces conditions, la valorisation d'un système de déshumidification par admission d'air extérieur, tel que l'AVS, est moins évidente. C'était le cas de la serre témoin du Ctifl dont la gestion de la déshumidification était gérée par une augmentation du chauffage pour élever le DH et une ouverture des ouvrants uniquement si cela ne suffisait pas.

Dans la serre équipée du système AVS, le nombre de déchets au mètre carré est le plus élevé, avec beaucoup de fruits verts ou touchés par la nécrose apicale. Il est possible que l'abaissement de la température maximale des forcas à 45°C au lieu des 60°C de la serre témoin ait eu une influence sur la maturation du dernier fruit de la grappe. En effet, ce dernier fruit se retrouvait plus souvent vert dans la serre AVS mais aussi dans la serre semi-fermée où la température maximale des forcas était aussi de 45°C. Ces fruits verts s'expliquent également par une mauvaise nouaison pendant une brève période où les bourdons n'étaient plus très actifs.

Cependant, la serre équipée du système AVS a des consommations en gaz et en eau plus faibles que la serre témoin. Elle pourrait donc être intéressante d'un point de vue environnemental même si sa consommation en électricité est un peu plus élevée.

Concernant la serre semi-fermée, la différence de rendement final est significative et l'investissement effectué à l'achat de la serre semble pouvoir être amorti relativement rapidement ce qui en fait un outil rentable par rapport à une serre témoin professionnelle.

Toutefois, il faut bien noter que pour obtenir ce résultat, la conduite climatique a été différente en serre semi-fermée. La conduite est donc à adapter et des améliorations sont sûrement encore possibles dans ce domaine. Un écart de rendement plus précoce dans la saison pourrait par exemple être envisagé au vu des courbes de cette année. En confinant plus tôt pour conserver des températures et le taux de CO₂ plus élevé dès le début de la culture, on pourrait envisager d'obtenir des rendements supérieurs à une serre classique dès les premiers mois. Cela serait un avantage certain au vu du cours de la tomate qui est beaucoup plus élevé à cette

période. Le rendement et le chiffre d'affaires pourraient être sensiblement augmentés. Cela n'a pas pu être testé sur cette culture à cause d'un manque de vigueur des plantes.

En serre semi-fermée, il y a eu un grand nombre de fruits touchés par la nécrose apicale. Ce phénomène est dû à une transpiration excessive des plantes qui entraîne une migration trop importante du calcium vers les feuilles au détriment des fruits et cela a pour conséquence l'apparition d'une nécrose au niveau de l'attache pistillaire de certains fruits. Les fortes chaleurs, qui peuvent être à l'origine d'une transpiration excessive des plantes, peuvent être bien gérées dans cette serre grâce au pad cooling. Il est donc étonnant de voir apparaître autant de fruits touchés par des nécroses. Cela peut être dû au à l'absence volontaire d'utilisation d'un écran d'ombrage lors de journées chaudes et ensoleillées : le rayonnement direct subi par les plantes a pu être trop intense. Il est également possible que le pad cooling ne soit pas assez réactif et que, même si le DH moyen journalier est bon, sur de courtes périodes (quelques minutes à quelques dizaines de minutes), le DH ait augmenté de manière trop extrême entraînant une transpiration excessive des plantes.

D'un autre côté, des améliorations pourraient être envisagées pour limiter les consommations de la serre et donc les dépenses. Les consommations en eau et en électricité sont beaucoup plus élevées dans cette serre. Un matériel plus propre en termes de consommation d'énergie aurait l'avantage de réduire les coûts de fonctionnement mais également d'apporter une image positive de la filière serre aux yeux du consommateur.

La modification du type d'ouverture du volet du corridor pourrait être une solution pour faciliter la gestion de son ouverture. Le volet pivotant a une influence sur la proportion d'air extérieur mélangé avec l'air recyclé du fait de l'angle d'arrivée de l'air. Un volet coulissant de haut en bas pourrait améliorer ce problème.

L'utilisation d'une serre semi-fermée demande donc une réelle adaptation de la part du chef de culture pour exploiter le maximum de ses possibilités. Le temps d'adaptation au nouveau matériel n'est pas un critère qui a pu être pris en compte dans cette étude mais il a une grande importance dans une situation professionnelle car une erreur de gestion du climat est facile à faire et peut rapidement pénaliser la culture.

Un autre facteur qui a pu influencer l'expérimentation est la présence du corridor en serre semi-fermée. En effet, le corridor est classiquement installé sur le côté nord de la serre. Dans le cas du Ctifl, le corridor a été construit sur le côté sud. Cela a donc un impact sur le rayonnement reçu par la serre le développement des plantes à proximité du corridor qui ont tendance à s'étioler en période hivernale.

Du point de vue du dispositif mis en place, la taille des serres utilisées pour l'expérimentation est représentative d'une serre professionnelle. Cependant, avec 1000 m² de surface, elles restent encore petites par rapport à des serres de plusieurs hectares comme on peut en voir dans la région nantaise. Il faut donc rester prudent sur ces résultats économiques car les différences observées pourraient être différentes sur de plus grandes surfaces.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que les résultats de l'étude technico-économique sont basés sur des estimations. Même si les méthodes d'estimations utilisées sont raisonnables et paraissent très plausibles, cela ne vaut pas un résultat relevé en fin de culture. Pour obtenir des résultats qui soient plus fiables, il faudrait continuer la culture jusqu'en semaine 47, comme chez la majorité des serristes professionnels de la région nantaise. Cela permettrait d'avoir des résultats vraiment représentatifs d'une culture de tomates hors-sol sous serre en région nantaise.

VI. Conclusion

Les deux modalités étudiées ici répondent globalement bien aux enjeux actuels de la filière tant en termes d'environnement que de production. L'AVS et la serre semi-fermée permettent une conduite de climat économe en énergie ce qui a une influence sur leur coût de fonctionnement.

L'AVS permet une gestion facilitée du DH et a donc une gestion plus fine de l'activité de plante. Ce système a permis d'obtenir un rendement équivalent à la serre témoin et de gérer la déshumidification de manière tout aussi efficace avec des températures de chauffage limitées à 45°C, soit 15°C de moins qu'en serre témoin. Cette réduction de consommation d'énergie est une avancée non négligeable dans une filière qui reste assez mal perçue par nombre de consommateurs en termes de respect de l'environnement. Cette étude ne permet pas d'affirmer que ce système est rentable pour un producteur mais ceci est en partie dû à la gestion de la déshumidification qui était déjà optimisée en serre témoin, ce qui n'est pas forcément le cas chez tous les producteurs.

La gestion de la déshumidification d'une serre classique avec des températures de chauffage bridées à 45°C est hypothétique et pourrait constituer un axe de recherche.

La serre semi-fermée, pour sa part, permet de s'affranchir du climat extérieur en période estivale ce qui est un avantage énorme. Il apparaît que, même dans ce type de serre, si on veut confiner le CO₂, on est obligé de monter en température mais cela reste plus facile à mettre en œuvre que dans une serre classique. Les consommations en gaz sont significativement réduites grâce à cette serre qui semble être une solution potentiellement intéressante pour les serristes dans le but de conserver leur compétitivité dans les années à venir. Elle demande une technicité supplémentaire au niveau de la gestion du climat du climat qui se traduira par un petit temps d'adaptation. L'avantage sur le long terme est cependant largement assez intéressant pour compenser ce temps d'adaptation et en fait un investissement rentable. Elle possède une efficacité énergétique plus élevée qu'une serre classique.

L'amélioration de la gestion du volet du corridor pourrait être une thématique de recherche intéressante pour optimiser encore ce système.

L'AVS et la serre semi-fermée présentent des avantages non négligeables mais des améliorations peuvent encore être apportées sur ces systèmes pour tendre vers une production sans déchets avec une efficacité énergétique encore plus élevée.

VII. Bibliographie

- ADAMS S.R., COCKSHULL K.E., CAVE C.R.J. (2001). Effect of Temperature on the Growth and Development of Tomato Fruits. *Annals of Botany*, 88, pp. 869-877
- BERTIN N., GARY C. (1993). Évaluation d'un modèle dynamique de croissance et de développement de la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), TOMGRO, pour différents niveaux d'offre et de demande en assimilats, *Agronomie*, 13, pp. 395-405
- BRAKEBOER T. (2008). Root temperature affects plant growth, *Fruit and Veg Tech*, vol. 8, 3, pp. 23-25
- DE GELDER A., DIELEMAN J.A., BOT G.P.A., MARCELIS L.F.M. (2012). An overview of climate and crop yield in closed greenhouse, *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 87, 3, pp. 193-202
- DIELEMAN J.A., MEINEN E., DUECK TH.A. (2005). Effects of Temperature Integration on Growth and Development of Roses, *Acta Horticulturae*, 691, pp. 51-58
- ELINGS A., MEINEN E., CAMPEN J., GELDER A. (2007). The Photosynthesis Response of Tomato to Air Circulation, *Acta Horticulturae*, 761, pp. 77-84
- FARNETI B., SCHOUTEN R., QIAN T., DIELEMAN J., TIJSKENS L., WOLTERING E. (2013). Greenhouse climate control affects postharvest tomato quality, *Postharvest Biology and Technology*, 86, pp. 354-361
- GRISEY A., BRAJEUL E. (2007). Serres chauffées : réduire ses dépenses énergétiques. Editions Ctifl, Hortipratic, Paris, 175 p.
- HEUVELINK E., BAKKER M.J., ELINGS A., KAARSEMAKER R., MARCELIS L.F.M. (2005). Effect of Leaf Area on Tomato Yield, *Acta Horticulturae*, 691, pp. 43-50
- HEUVELINK E., BAKKER M.J., MARCELIS L.F.M., RAAPHORST M. (2008). Climate and Yield in a Closed Greenhouse, *Acta Horticulturae*, 801, pp. 1083-1092
- HUDCKSTADT A., SUTHAPARAN A., MORTENSEN L., GISLEROD H. (2013). The Effect of Low Night and High Day Temperatures on Photosynthesis in Tomato, *American Journal of Plant Sciences*, 4, pp. 2323-2331
- JAGERS F. (2009). Complete control in Ultra-Clima greenhouse, *Fruit and Veg Tech*, vol. 9, 2, pp. 6-9
- MARCELIS L.F.M., BROEKHUIJSEN A.G.M., MEINEN E., NIJS E.M.F.M., RAAPHORST M.G.M. (2006). Quantification of the growth response response to light quantity of greenhouse grown crops, *Acta Horticulturae*, 711, pp. 97-103
- MARCELIS L.F.M. (2011). Advances in energy conservation in greenhouses. In : Proceedings of the UK controlled Environment Users' Group "Greenhouse technology and

practice”, Sand Hutton, York, YO41 1LZ, United Kingdom, 6-7 Septembre 2011, vol. 22, pp. 6-11

MAX J., HORST W., MUTWIWA U., TANTAU H.-J. (2009). Effects of greenhouse cooling method on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a tropical climate, *Scientia Horticulturae*, 122, pp. 179–186

MOUMOUNI A.K. (2012). Dans quelles mesures l’entreprise Pomalie pourra-t-elle optimiser son système de recyclage et de désinfection aux UV en tomates hors sol ? Mémoire de fin d’études, Agrocampus Ouest, Angers, 40 p.

PRENGER J., LING P. (2001). Greenhouse Condensation Control : Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD), *The Ohio State University Extension, Food Agricultural and Biological Engineering Series*, AEX-804-01, pp. 1-4

RIGHI E., BURIOL G., ANGELOCCI L., HELDWEIN A., TAZZO I. (2012). Relationships of Photosynthetic Photon Flux Density, air Temperature and Humidity with Tomato Leaf Diffusive Conductance and Temperature, *Brazilian archives of biology and technology*, vol. 55, 3, pp. 359-370

SARLIKIOTI V., DE VISSER P., BUCK-SORLIN G., MARCELIS L.F.M. (2011). How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato: towards an ideotype for plant architecture using a functional–structural plant model, *Annals of Botany*, 108, pp. 1065–1073

SUZUKI M., UMEDA H., MATSUO S., KAWASAKI Y., AHN D., HAMAMOTO H., IWASAKI Y. (2015). Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production, *Scientia Horticulturae*, 187, pp. 44–49

VOX G., TEITEL M., PARDOSSI A., MINUTO A., TINIVELLA F., SCHETTINI E. (2010). Chapter 1 - Sustainable Greenhouse Systems. In: *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*, Edité par SALAZAR A., RIOS I., New-York, pp. 1-79

ZHANG Z., LIU L., ZHANG M., ZHANG Y., WANG Q. (2014). Effect of carbon dioxide enrichment on health-promoting compounds and organoleptic properties of tomato fruits grown in greenhouse, *Food Chemistry*, 153, pp. 157–163

VIII. Sitographie

DE RUITER (2014). DRO 141TX

http://www.deruiterseeds.com/global/uk/products/Documents/ProductLeaflets/Rootstock/UK_Rootstock_DRO141TX.pdf.pdf

FAO STAT (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division

<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (consulté le 24/03/2015)

FRANCE AGRIMER (2014). Les filières de fruits et légumes : Données 2013.

<http://www.franceagrimer.fr/content/download/36560/335092/file/chiffres%20cl%C3%A9s%20FL%202013.pdf> (consulté le 25/03/2015)

SYNGENTA (2015). Tomates de serre 2015.

<http://www3.syngenta.com/country/fr/SiteCollectionDocuments/Publications/Legumes/tomate-de-serre-2015.pdf> (consulté le 27/03/2015)

VAN DIJK (2012). Active ventilation system (AVS-WTW)

<http://www.vandijkheating.com/UserFiles/File/ProductFolders/6.04-EN-V1.0.pdf> (consulté le 18/04/2015)

VITRE A. (2002). Conduite climatique de la culture de tomate.

<http://www.agrireseau.qc.ca/legumesdeserre/Documents/05.%20Canada%202002%20Conduite%20climatique%20de%20la%20culture%20de%20tomate.pdf> (consulté le 06/05/2015)

VITRE A. (2003). La gestion du travail en serre de tomate

<http://www.agrireseau.qc.ca/legumesdeserre/Documents/09%20Canada%202002%20%20Le%20travail%20sur%20les%20plantes%20de%20tomate.pdf> (consulté le 24/07/2015)

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2014-2015

Spécialité :

Horticulture

Spécialisation (et option éventuelle) :

Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés

Annexes

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre

Par : Thybaud BRAZEAU



Soutenu à Angers le 11/09/2015

Devant le jury composé de :

Président : Mickaël DELAIRE

Maître de stage : Serge LE QUILLEC

Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU

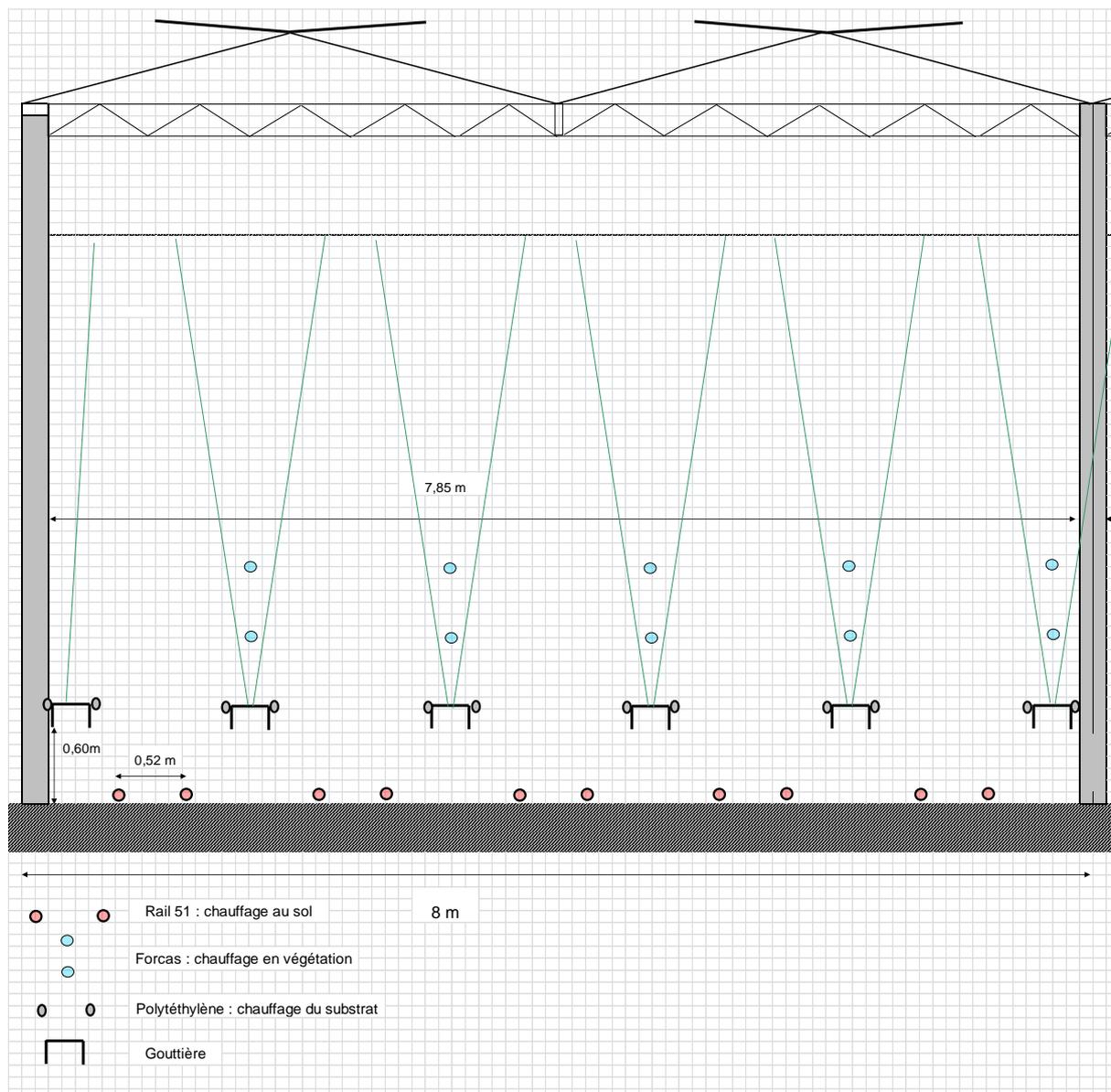
Autres membres du jury :

Pierre-Emmanuel BOURNET

François GREGOIRE

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

Annexe I : Dispositif culturel d'une double chapelle



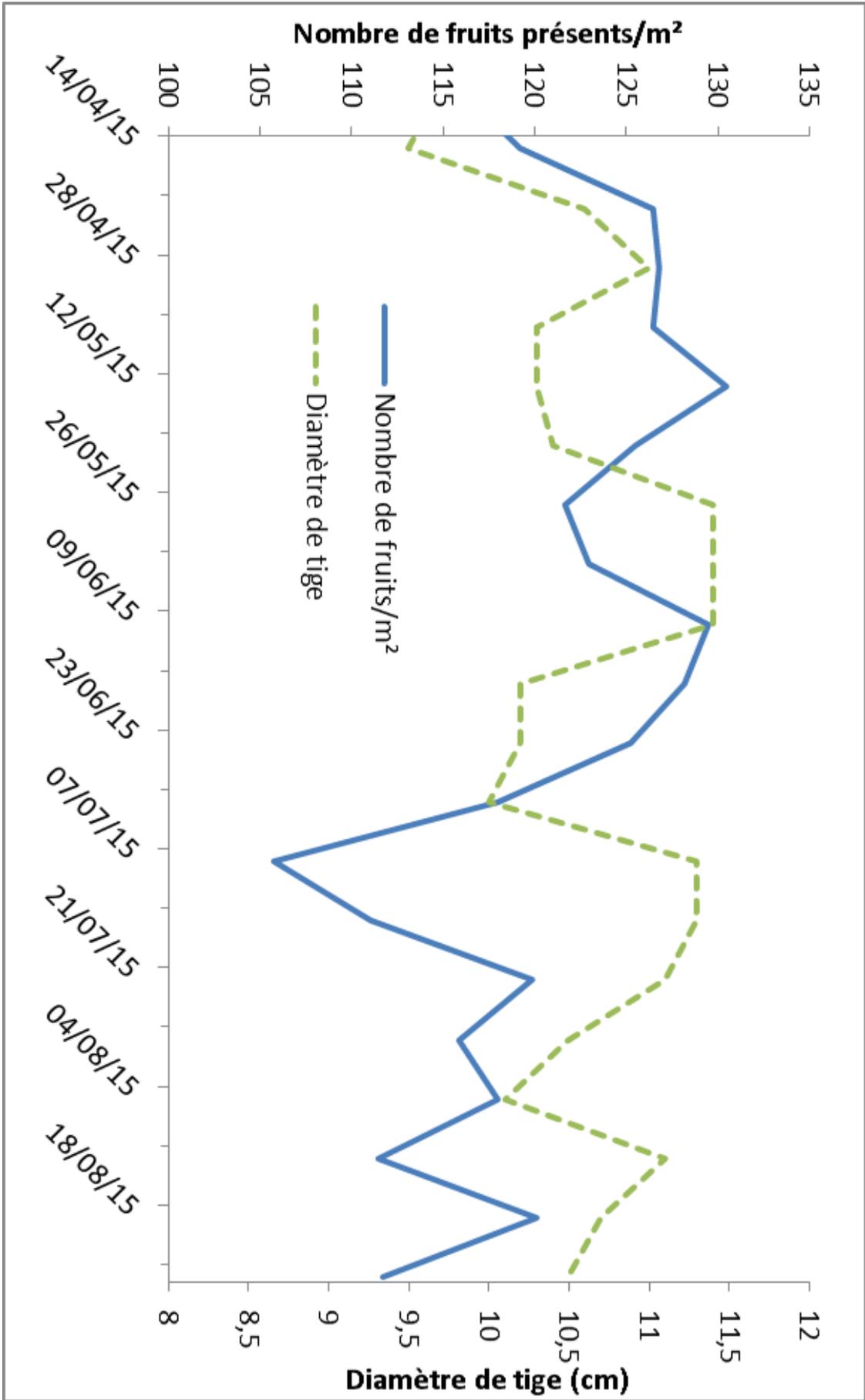
Annexe II : Consignes climatiques des différentes serres sur l'ensemble de la culture

	du 03/12/2014 au 16/12/2014	du 17/12/2014 au 22/12/2014	du 23/12/2014 au 26/01/2015	du 27/01/2015 au 17/03/2015
Serre témoin	- Chauffage par Rail 51 (pas de Forcas) - Maxi Rail 51: 65°C	- Activation réseau PE - Priorités chauffage: 1:PE / 2:Rail 51 (0,5°C sous consigne) - Maxi Rail 51: 65°C - Maxi PE: 45°C	- Activation double réseau forcas - Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C
Serre AVS	- Chauffage par Rail 51 (pas de Forcas) - Maxi réseaux de chauffage: 65°C	- Activation réseau PE - Priorités chauffage: 1:PE / 2:Rail 51 (0,5°C sous consigne) - Maxi Rail 51: 65°C - Maxi PE: 45°C	- Activation double réseau forcas - Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3: Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Activation chauffage AVS sur température de gaines - Priorités chauffage: 1:Forcas et AVS / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C
Serre semi-fermée	- Priorité chauffage: Rail 51 + AHU (pas de Forcas) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Activation réseau PE - Priorités chauffage: 1:PE / 2:Rail 51 et AHU (0,5°C sous consigne) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Activation double réseau forcas - Priorités chauffage: 1:Forcas et AHU / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AHU / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C
	du 18/03/2015 au 30/03/2015	du 31/03/2015 au 25/04/2015	du 26/04/2015 au 18/05/2015	depuis le 19/05/2015
Serre témoin	- Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et PE / 2:Rail 51 (-0,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: Forcas et Rail 51: 60°C; réseau PE: 45°C
Serre AVS	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AVS / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 60°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AVS / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AVS / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-1,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et PE / 2:Rail 51 (-0,5°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C
Serre semi-fermée	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AHU / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et AHU / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Augmentation de 1°C de la consigne jour par rapport aux 2 autres modalités - Priorités chauffage: 1:Forcas et AHU / 2:PE (-0,5°C) / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C	- Priorités chauffage: 1:Forcas et PE / 3:Rail 51 (-2°C) - Maxi réseaux de chauffage: 45°C

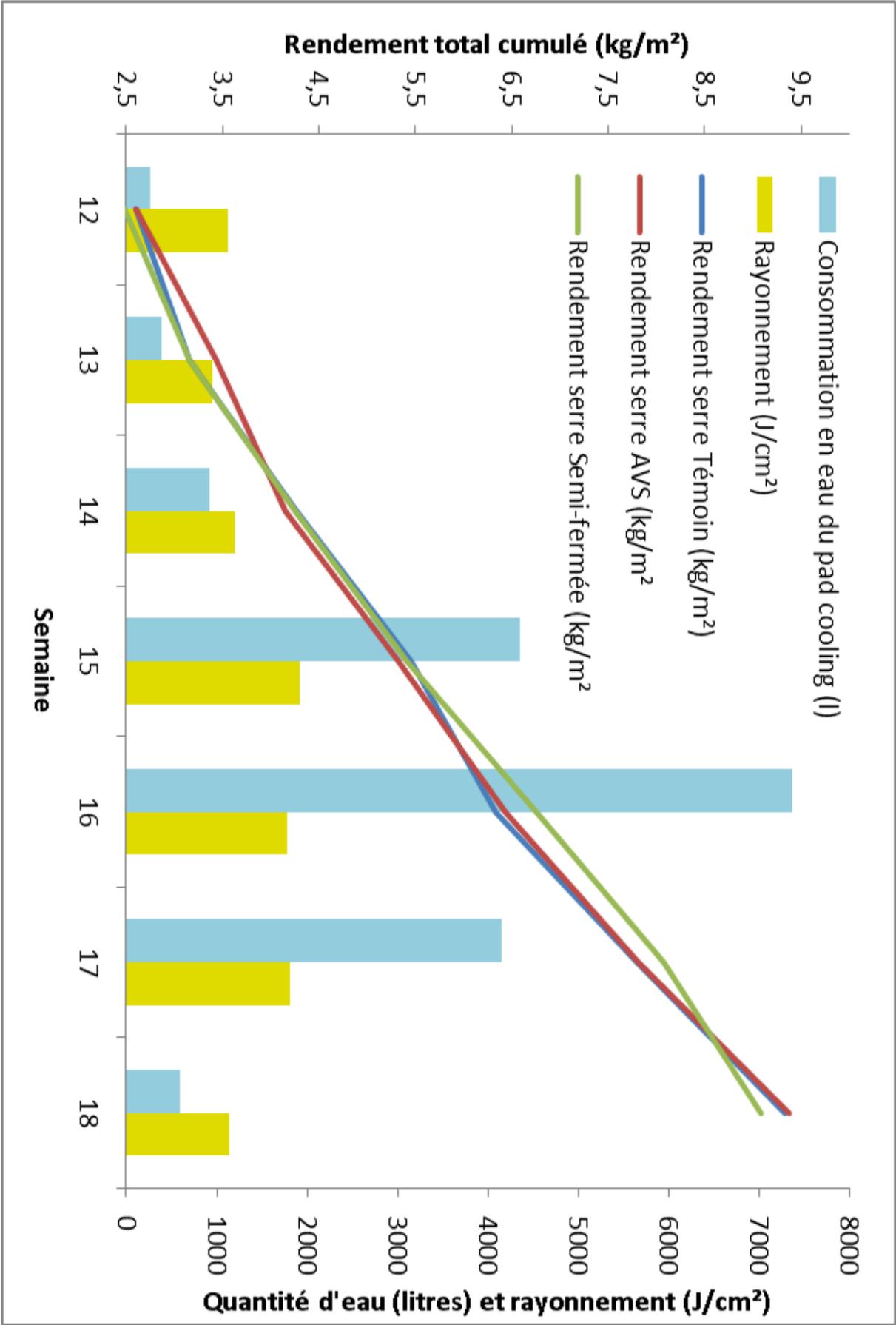
Annexe III : Evolution du délai floraison-récolte en serre témoin

Semaine	Stade floraison	Stade récolte	Délai floraison-récolte en semaines
3	3,2	0	
4	4	0	
5	4,7	0	
6	5,4	0	
7	5,9	0	
8	6,6	0	
9	7,6	0	
10	8,5	0	
11	9,4	0,7	
12	10,1	1,4	
13	11	2	
14	12	2,9	11
15	13	3,8	11
16	14	4,6	11
17	14,9	5,7	
18	16,1	6,8	10
19	16,9	7,5	10
20	17,9	8,8	10
21	18,7	9,8	
22	19,9	11	9
23	20,9	12,1	9
24	21,9	13,1	9
25	22,8	14,1	9
26	23,9	15,2	
27	25	16,8	8
28	26,2	17,6	
29	27,2	18,4	
30	28,2	19,7	8
31	29,4	20,5	
32	30,3	21,6	
33	31,2	22,6	8
34	32,2	23,6	

Annexe IV : Relation entre le nombre de fruits sur les plantes et le diamètre de tige en serre témoin



Annexe V : Mise en relation de l'utilisation du pad cooling avec la baisse de rendement du mois d'avril



	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU
Auteur(s) : Thybaud BRAZEAU Date de naissance* : 26/09/1991	Organisme d'accueil : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes Adresse : Z.I. Belle Etoile – Antarès 35 allée des Sapins Carquefou 44483 Carquefou
Nb pages : 40 Annexe(s) : 5	Carquefou 44483 Carquefou
Année de soutenance : 2015	Maître de stage : Serge LE QUILLEC
Titre français : Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre Titre anglais : Impacts and technical-economic analysis for several climatic managements in greenhouse of soilless tomato crop	
Résumé (1600 caractères maximum) : Dans un but de compétitivité, de nouveaux systèmes sont régulièrement développés pour améliorer la production sous serre. Cette étude s'intéresse à la rentabilité du système de ventilation active (AVS) Van Dijk et de la serre semi-fermée Ultraclima® par rapport à une serre classique sur une culture de tomates hors-sol sous serre verre dans la région nantaise. Il apparaît que ces deux matériels permettent de réduire les coûts de fonctionnement d'une culture de tomates. Une économie d'environ 1,51€/m ² avec l'AVS et 0,86€/m ² avec la serre semi-fermée est réalisable sur l'ensemble d'une culture. Cette baisse des coûts est due à une économie de gaz significative grâce à ces deux systèmes qui valorisent mieux le chauffage basse température. D'autre part, la serre semi-fermée permet d'augmenter le chiffre d'affaires de 4,49€/m ² tandis que l'AVS n'a pas d'incidence significative sur ce résultat. Cependant, l'AVS coûte 10€/m ² de plus qu'une serre classique à l'installation et la serre semi-fermée coûte 30€/m ² supplémentaires. L'investissement dans un AVS semble donc peu intéressant pour un producteur car il devra attendre 8 ans avant d'amortir son achat. En revanche, l'investissement dans une serre semi-fermée sera amorti en moins de 6 ans avec des profits non négligeables ensuite, ce qui en fait un matériel rentable.	
Abstract (1600 caractères maximum) : New systems are regularly developed to improve greenhouse's crop production. In this study, the profitability of two systems is examined: an active ventilation system (AVS) from Van Dijk company and a Ultraclima® semi-closed greenhouse from Kubo company. This trial has been conducted in the region of Nantes, France. These two materials allow a running cost's decrease. Results showed that AVS is able to save about 1,51€/m ² on this cost at the end of a soilless tomato crop mainly because of a reduction of gas consumption. A semi-closed greenhouse allow a running cost's save of 0,86€/m ² . Yet, the semi-closed greenhouse is able to significantly increase production which results in an increase of the turnover. Thus, an approximate gain of 4,49€/m ² is possible with this greenhouse. However, the purchase cost of this greenhouse is about 30€/m ² more than a traditional greenhouse. The purchase cost of the AVS is about 10€/m ² . This means an investment in an AVS doesn't seem to be profitable for a grower because he must wait 8 years to absorb his expense. On the contrary, an investment in a semi-closed greenhouse could be profitable because the expense will be absorbed in less than 6 years and the future profits will be important.	
Mots-clés : tomate, serre, hors-sol, conduite climatique, système de ventilation active, semi-fermée, consommation, rentabilité Key Words: tomato, greenhouse, soilless crop, climate management, active ventilation system, semi-closed, consumption, profitability	