



HAL
open science

Évaluation d'un tunnel bioclimatique en culture de fraise hors-sol

Jean-Alcyon Nteppe-Nyemb

► **To cite this version:**

Jean-Alcyon Nteppe-Nyemb. Évaluation d'un tunnel bioclimatique en culture de fraise hors-sol. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03118442

HAL Id: dumas-03118442

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03118442>

Submitted on 22 Jan 2021

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

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

<p>AGROCAMPUS OUEST</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CFR Angers <input type="checkbox"/> CFR Rennes</p> <p>l'institut Agro agriculture • alimentation • environnement</p> 	 <p>université angers</p>  <p>UNIVERSITÉ DE NANTES</p>	
<p>Année universitaire : 2019-2020</p> <p>Mention : Biologie végétale</p> <p>Parcours : Filière de de l'Horticulture et Innovation</p>	<p>Mémoire de Fin d'Études</p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>	

Evaluation d'un tunnel bioclimatique en culture de fraise hors-sol

Par : NTEPPE-NYEMB Jean-Alcyon



Soutenu à ANGERS

le*

10/09/2020

Devant le jury composé de :

Président : TEULAT Béatrice

Maître de stage : GRISEY Ariane

Enseignant référent : CHANTOISEAU Etienne

Autres membres du jury : GEOFFRIAU Emmanuel

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



Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

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

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

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

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **Nom Prénom NTEPPE-NYEMB Jean-Alcyon**
autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

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

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable du master ou son représentant

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

Oui Non

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

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

Remerciement

Je souhaite tout d'abord remercier ma famille, mes parents, NYEMB Jean-Albert et NGO DJIKI Jeanne D'arc, ma tante, Tata Caty, ainsi que mes frères et sœurs. Je souhaiterais aussi remercier mon entourage (mes amis) qui m'ont soutenu et encouragé durant ces nombreuses années.

J'adresse des remerciements particuliers à Mme. GRISEY Ariane ma maîtresse de stage, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage à la station du CTIFL de Balandran, d'avoir partagé un peu de son expertise et de m'avoir aidé dans la rédaction de ce rapport qui a été réalisé dans des conditions un peu particulières.

Je remercie M.CHANTOISEAU Etienne d'avoir tutoré ce stage et ainsi que pour ces conseils avisés.

Je remercie aussi l'équipe Fraise de l'unité Matériel Végétal, ainsi que les autres stagiaires pour m'avoir si chaleureusement accueillis lors de ma semaine sur le terrain.

Je souhaite également remercier le corps enseignant du Master de Biologie végétale de l'Université d'Angers et celui d'AGROCAMPUS OUEST.

Enfin je souhaiterais remercier ma Désirée Jasmine de m'avoir soutenu, encouragé et sans qui ces deux années de master n'auraient pas été les mêmes.

Comme disait le Pape de l'assiko Jean Bikoko « Hiki djâm li gwée ngèn ».

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	Présentation du CTIFL	1
1.2	Contexte et enjeux	1
1.3	Le projet de tunnel bioclimatique au CTIFL	3
2	Problématique	3
3	Etat de l'art de la culture de fraises sous tunnel	5
3.1	Physiologie du Fraisier	5
3.2	Maladies fongiques sur la fraise	5
3.2.1	L'oïdium	5
3.2.2	Botrytis	7
3.3	Le climat dans la serre	7
3.3.1	Chauffage et consommation électrique dans la serre	7
3.3.2	Température et Hygrométrie	9
3.3.3	Le déficit hydrique (DH)	11
3.4	Irrigation	11
4	Serre bioclimatique (outil de production efficient en énergie)	11
4.1	Les serres passives et actives	11
4.2	La serre solaire chinoise ou Chinese solar greenhouse (CSG)	13
4.3	Serre passive avec stockage dans des hydro-accumulateurs	13
4.4	Serre passive utilisant des PCM comme matériel de stockage	15
5	Matériels et Méthodes	15
5.1	Dispositif expérimental	15
5.2	Energie stockée	17
5.3	Les variétés de fraises	17
5.4	Matériel de mesure	19
5.5	Etude de risque de condensation	19
5.6	Etude du risque de surchauffe	19
5.7	Formules	19
5.8	Traitement de données	21
6	Résultats	23
6.1	Résultats de l'étude du climat	23
6.1.1	Température de journée et soirée	23
6.2	Période à risque de surchauffe dans les tunnels	25
6.3	Déficit hydrique (DH) de journée et soirée	27
6.3.1	Périodes à risque de condensation	29
6.4	Energie stockée dans le système bioclimatique	29

6.5	Etude de rendement	31
6.5.1	Première floraison (PF)	31
6.5.2	Seconde floraison (Remontée ou SF).....	33
6.5.3	Fin de culture.....	35
7	Discussion	37
7.1	Discussion climat Première floraison	37
7.2	Discussion climat Seconde floraison	39
8	Conclusion.....	43

Liste des abréviations

ANOVA : Analysis of Variance

BP : Brique perforée

Cm³ : Centimètre cube

Cp : capacité thermique

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DH : Déficit hydrique

Er : Energie reçue

GES : Gaz à effet de serre

h : Hauteur

HR : Humidité relative

IR : Infra-rouge

J : Joule

kPa : Kilo Pascal

kWh : Kilo Watt heure

l : Longueur

L : Largeur

m² : mètre carré

PAR : Photosynthèse Active Radiation

PCM : Phase Change material (matériaux à changement de phase)

PF : Première Floraison

PPE : panneaux de polystyrène expansé

Ptot : Pression atmosphérique totale

Pvs : Pression de vapeur à saturation

r : Teneur en eau

RGh : Rayonnement global

S : Surface totale du tunnel

SF : Seconde Floraison

T° : Température ambiante en (°C)

TBC : Tunnel Bioclimatique

TDP : Tunnel Double Paroi

T_h : Température humide

T_R : Température de rosée

TSP : Tunnel Simple Paroi

V : volume

m^3 : mètre cube

$^{\circ}C$: Degré Celcius

ΔT : Différentiel de température dans les bidons

TMJTBC : Température Moyenne Journée dans le Tunnel bioclimatique

TMJTDP : Température Moyenne Journée dans le Tunnel Double Paroi

TMJTSP : Température Moyenne Journée dans le Tunnel Simple Paroi

TMJE : Température Moyenne Journée à l'Extérieur

TMSTBC : Température Moyenne Soirée dans le Tunnel Bioclimatique

TMSTDP : Température Moyenne Soirée dans le Tunnel Double Paroi

TMSTSP : Température Moyenne Soirée dans le Tunnel Simple Paroi

TMSE : Température Moyenne Soirée à l'Extérieur

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des centres CTIFL et stations régionales d'expérimentation .	10
Figure 2 : Schéma d'une serre solaire (Ling et al., 2014)	12
Figure 3 : Plan du tunnel	14
Figure 4 : Dispositif de stockage (coupe transversale)	14
Figure 5 : Dispositif de stockage (coupe horizontale)	14
Figure 6 : Exemple de fruit déformé (Ciflorette)	16
Figure 7 : Exemple de fruits pourris (Ciflorette)	16
Figure 8 : Sonde de fruit	18
Figure 9 : Période à risque de surchauffe en Mai et Juin	24
Figure 10 : Nombre d'heures à risque de condensation dans le TBC (Mars-Juin)	28
Figure 11 : Nombre d'heures à risque de condensation dans le TSP (Mars-Juin)	28
Figure 12 : Exemple de fonctionnement du bidon en fonction de la température pour 3 jours	28

Table des tableaux

Tableau 1 : Stade phénologiques du plant de fraiser (<i>Fragaria ananassa</i> Duch.) selon la classification du BBCH.....	4
Tableau 2 : Consigne d'aération pour les 3 tunnels.....	16
Tableau 3 : Résumé des températures de journée (Février-Juin).....	22
Tableau 4 : Résumé des températures de soirée (Février-Juin).....	22
Tableau 5 : Période de surchauffe (Février-Juin).....	24
Tableau 6 : Résumé DH journée (Février-Juin).....	26
Tableau 7 : Résumé DH soirée (Février-Juin).....	26
Tableau 8 : Suivi de la quantité d'énergie stockée (Janvier-Juin).....	30
Tableau 9 : Résumé récolte 1ère Floraison.....	30
Tableau 10 : Résumé récolte 2ème Floraison.....	32
Tableau 11 : Résumé de récolte Fin de culture.....	34



Figure 1 : Localisation des centres CTIFL et stations régionales d'expérimentation

1 INTRODUCTION

1.1 Présentation du CTIFL

Le CTIFL, Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, créé en 1952, est l'organisme de recherche et de développement au service des métiers de la filière fruits et légumes, de la production à la distribution. Véritable pivot au carrefour de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée et de l'innovation, le CTIFL travaille en lien direct avec les professionnels.

Il se compose d'un centre décisionnel à Paris, de deux antennes à Rungis (94) et à Nancy (54) et de quatre centres d'expérimentation à Carquefou (44), Lanxade (24), Saint-Rémy-de-Provence (13) et Balandran (30) (Figure 1).

L'objectif du CTIFL est de maintenir la compétitivité des entreprises françaises de la filière fruits et légumes en contribuant à l'amélioration de leurs performances. Ses travaux sont axés sur :

- Des expertises technique et économique
- Des activités de recherche et d'innovation
- La diffusion d'informations à travers des brochures notamment

Le centre de Balandran, situé à 16 km au sud de Nîmes, fait partie du pôle CTIFL « Rhône Méditerranée » avec le centre « Qualité et technologies » de Saint Rémy-de-Provence.

L'équipe Fraise de l'unité Matériel Végétal est chargée de tout le suivi expérimental concernant la production de fraise hors-sol sous serres ou tunnels chauffés ou froids. Elle est composée de Justine Garnodier et Myriam Capron (technicienne). Ariane Grisey de l'unité Environnement et Energie intervient en appui sur les expérimentations serre en fraise et en tomate.

1.2 Contexte et enjeux

La production de fraise en France se fait principalement sous abris hauts en plastique (Xiao *et al.*, 2001). La serre ou le tunnel est un système qui permet d'apporter les meilleures conditions de croissance, de développement ainsi que de rentabilité pour une culture donnée en jouant sur les principaux paramètres que sont : la lumière, la température, l'hygrométrie, et la nutrition minérale et carbonée.

Ces systèmes créent un environnement plus favorable à la culture afin de prolonger la période de récolte, d'augmenter le rendement et la précocité mais aussi de réduire les attaques des pathogènes (Grijalba *et al.*, 2015)

Pour créer ces conditions, un apport de chaleur est nécessaire dans les régions de l'hémisphère Nord, en hiver. Le chauffage et la déshumidification sont les postes principaux de consommation d'énergie dans les serres en tomate et concombre. 87% de cette énergie provient de sources fossiles non renouvelables (Gaz naturel 77% et Fioul 2%) dans les serres conventionnelles (Grisey Brajeul et Decker 2017).

Des études sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), ont montré que l'agriculture représente 10 à 12 % du total des GES avec le dioxyde de carbone (CO₂) (Hosseini-Fashami et al. 2019). Il est donc important de réduire l'usage des énergies fossiles dans les années à venir afin d'en limiter leurs impacts (Beshada, Zhang, et Boris 2006).

Les avantages des tunnels non chauffés sont qu'ils sont peu coûteux et constituent une alternative viable par rapport aux systèmes avec chauffage en raison de leur rapport d'optimisation technico-économique favorable (Grijalba *et al.*, 2015).

Mais cette production peut être limitée notamment en période hivernale du fait d'une faible température d'air à l'intérieure, mais qui reste en moyenne toujours supérieure de 1-4°C à celle de l'extérieur (Knewton, Carey, et Kirkham 2010).

A ce jour, peu d'innovations existent pour améliorer le rendement et la gestion climatique des tunnels non chauffés car les paramètres sur lesquels agir sont peu nombreux. Une des innovations possibles est le tunnel bioclimatique qui est équipé pour stocker l'énergie de la journée et la restituer la nuit.

Ce système s'adresse préférentiellement aux petites et moyennes surfaces de production sous serre ou tunnel froids et tempérées (<15°C la nuit) dont les rendements de chauffages sont les moins bons. De telles surfaces de culture concernent les producteurs horticoles (surface moyenne de 5000 m²), et les producteurs de légumes ou de petits fruits sous abris plastiques comme la fraise, pour lesquels l'innovation technologique est restée limitée étant donné le coût d'accès des serres chauffées. De plus, cette technologie présente un intérêt pour les abris en agriculture biologique.

1.3 Le projet de tunnel bioclimatique au CTIFL

Le CTIFL a beaucoup travaillé sur les serres chauffées dites « high tech » où un ensemble de paramètres sont contrôlés : température, hygrométrie, CO₂, lumière. L'organisme souhaite transposer des solutions aux abris peu ou pas chauffés qui représentent l'essentiel des surfaces en France. L'expérimentation du tunnel bioclimatique en culture de fraise entre donc dans cette dynamique. Le projet a débuté en 2018 la première année d'étude (2018-2019) a été réalisée sans culture. Pour cette seconde année d'étude (2019-2020), des plants de fraises ont été introduits, les conditions climatiques (température, hygrométrie..), ainsi que le comportement agronomique vont être observés.

2 Problématique

La problématique de ce stage concerne la mise en place d'une culture de fraise sous tunnel bioclimatique. En effet lors de la première année d'essai en 2018, l'étude du tunnel a été faite sans culture. On peut donc se demander si en présence d'une culture, le tunnel bioclimatique sera plus performant agronomiquement que les tunnels de référence mais aussi plus compétitif énergétiquement par rapport à des serres chauffées.

Pour répondre à cette question, le stage s'articulera autour de trois points :

- Une étude du climat du tunnel bioclimatique en comparaison avec celui des autres tunnels.
- Une étude de l'énergie stockée dans le tunnel bioclimatique sur la période d'essai.
- Une étude de rendement sur les trois tunnel

Tableau 1 : Stade phénologiques du plant de fraiser (*Fragaria ananassa* Duch.) selon la classification du BBCH

(Bleiholder et al., 2001)

Tableau 1 : Stades phénologiques du plant de fraisier (*Fragaria ananassa* Duch.) selon la classification du BBCH (Bleiholder et al., 2001)

STADE 0	Pousse et développement des bourgeons (dormance et gonflement du bourgeon principal)
STADE 2	Développement des feuilles (émergence de la 1 ^{ère} feuille, 1 ^{ère} feuille dépliée, jusqu'à au moins 9 feuilles dépliées)
STADE 4	Développement des stolons et jeunes plants (formation des premiers stolons, premier plant fille, développement racinaire du plant fille, plusieurs plants fille avec racines)
STADE 5	Emergence des inflorescences (1 ^{er} ensemble de fleur au sommet de la rosette, élongation de l'inflorescence, stade ballon, majorité des fleurs avec pétales qui forment une balle creuse)
STADE 6	Floraison (1 ^{ère} fleur ouverte jusqu'à toutes les fleurs fanées avec la majorité des pétales tombés)
STADE 7	Développement du fruit (protubérance du réceptacle, akènes nettement visibles sur le réceptacle, formation du fruit vert)
STADE 8	Maturité du fruit (début de maturation, formation du fruit blanc, passage au fruit rose, rouge, récolte principale)
STADE 9	Sénescence et début de dormance (initiation des bourgeons axillaires, nouvelles feuilles, mort des anciennes feuilles)

3 Etat de l'art de la culture de fraises sous tunnel

3.1 Physiologie du Fraisier

Le fraisier est une plante vivace dite « en rosette » qui se caractérise par une morphologie évolutive (repos végétatif, émission de stolons, fructification), lui permettant en outre de résister au froid de l'hiver. Il existe 3 groupes de variétés classées selon leur réaction à la longueur du jour :

- Les variétés de non-remontantes (de jours courts) : en conditions classiques de production, l'induction florale se fait au cours de l'automne lorsque la longueur du jour est inférieure à la longueur du jour critique (plus ou moins 13 heures). La plante fleurit et produit au printemps.
- Les variétés semi-remontantes : la longueur du jour critique se situe aux environs de 14H30. L'induction commence au mois d'août et le développement des premières hampes s'achève en hiver.
- Les variétés remontantes : la longueur du jour critique est d'environ 16 heures. L'induction florale se produit toute l'année avec une floraison théorique continue (Guérineau et al., 2003).

Ainsi on peut déterminer les stades de développement du fraisier (Tableau 1).

3.2 Maladies fongiques sur la fraise

L'oïdium et le botrytis sont les plus importantes maladies de la fraise et peuvent sérieusement réduire le rendement et la qualité post-récolte des fruits.

3.2.1 L'oïdium

L'oïdium du fraisier est causé par le champignon pathogène obligatoire *Sphaerotheca macularis f. sp. fragariae*. La maladie atteint les feuilles, les fleurs et les fruits du plant. Les signes et les symptômes de l'oïdium comprennent une croissance mycélienne blanche d'aspect poudreux, généralement sur la face inférieure des feuilles, un enroulement vers le haut des bords des feuilles, des taches sèches et violacées sur la face inférieure des feuilles et des structures rondes foncées (cléistothèces) intégrées dans le mycélium. Les plantes gravement infectées ont une vigueur réduite.

L'oïdium de la fraise infecte tous les organes de surface, notamment les feuilles, les stolons, les fleurs et les fruits. Lorsque l'oïdium infecte les fleurs, les fruits peuvent être malformés ou avortés. L'infection des fruits en fin de saison peut entraîner des pertes de récolte importantes. Les conidies de *P. aphanis* sont principalement propagées par le vent, et leur dispersion est inhibée par l'eau libre, comme la pluie ou l'irrigation par aspersion. Les conidies germent à des températures comprises entre 15 et 25°C. Lorsque l'humidité relative est supérieure à 75%. Dans des conditions optimales, les conidies sur les feuilles de fraisier germent 4 à 6 heures après l'inoculation et forment des appressoria dans les 12 heures. La germination et le développement de la colonie sont affectés par l'eau libre (Kennedy et al. 2013).

Le système de culture n'est pas neutre, des essais au champ de plants soumis à l'apport d'inoculum identique montrent des différences de contamination entre les conditions de serre verre et de tunnel aéré. Le taux de contamination plus élevé et la dispersion des spores plus grande en tunnel qu'en serre sont à relier aux aspects climatiques différents selon le type d'abri (Bardet, 2012).

3.2.2 Botrytis

La moisissure grise, causée par *Botrytis cinerea* Pers.:Fr, résulte principalement d'une infection latente des parties de la fleur, qui se transforme en pourriture une fois que le fruit commence à mûrir. Le stade de la fleur ouverte, le stade du fruit blanc (stade 8) et de la senescence (stade 9) sont les plus sensibles à l'infection, tandis que les fleurs au stade du bourgeon vert (stade 7) sont relativement résistantes (Tableau 1). Les infections au (stade 8), sont beaucoup moins susceptibles d'entraîner une moisissure grise que les infections au (stade 6). Le développement de la maladie est fortement corrélé avec des longues périodes d'humidité relative et de températures relativement élevées notamment en période de floraison (Xu, Harris, et Berrie 2000).

La température influence toutes les phases de développement des agents pathogènes, tandis que la durée d'humidité foliaire, c'est-à-dire la période pendant laquelle l'eau libre est présente sur le couvert végétal, influence le processus d'infection (Montone *et al.*, 2016).

3.3 Le climat dans la serre

Le climat dans la serre est dépendant du climat extérieur. Le principal facteur est le rayonnement solaire puisqu'il permet d'augmenter la température à l'intérieur par effet de serre. Les courtes longueurs d'ondes émises par le soleil arrivent au niveau des parois de la serre. Une partie des rayons incidents est réfléchi par les parois, la grande majorité est transmise à l'intérieur de la serre. Parmi les rayons transmis certains sont absorbés par les constituants de la serre (les plantes et le sol principalement). Une partie de ces rayons absorbés peuvent être réémis sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde (infra-rouge). 50% des infra-rouge (IR) sont absorbés par le verre puis réémis vers l'extérieur, les autres sont piégés dans la serre. Les IR sont porteurs d'énergie thermique, piégés dans la serre ils permettent d'augmenter la température. Une surface soumise au rayonnement peut avoir une température jusqu'à 10°C au-dessus de la température de l'air (Parceveaux et Hubert., 2007). Cet effet de serre est positif l'hiver dans les régions froides, par exemple dans le nord-ouest de l'Europe.

3.3.1 Chauffage et consommation électrique dans la serre

La consommation de fraise en frais, est passée de la consommation d'un produit de saison à la consommation d'un produit disponible toute l'année. La désaisonnalisation des produits, remarquée depuis une quinzaine d'années, a été provoquée par « la double pression du développement de l'agriculture hors sol et de la création d'un marché mondial » (Grisey et Pommier, 2007) Il a donc fallu développer des techniques de production permettant de produire toute l'année. La serre avait pour objectif initial de protéger les cultures contre les aléas climatiques, mais progressivement des systèmes de chauffage ont été installés car la précocité était un gage de meilleurs prix. Pour permettre une production toute l'année, la serre a été équipée de systèmes de maîtrise du climat.

En effet, une production optimale toute l'année nécessite la maîtrise constante du climat par le producteur. Cette maîtrise ne fait pas sans électricité, qui est indispensable pour le fonctionnement des équipements du système d'irrigation (pompes), de chauffage (allumage des brûleurs, circulateurs, vannes du circuit d'eau et ballon de stockage) (Grisey et Pommier, 2007). Dans une exploitation, il n'est pas évident de connaître la répartition de la consommation électrique, car les exploitations ne disposent pas de compteurs électriques par bâtiments ou installations. Selon une étude du CTIFL, 95 % de l'électricité consommée dans une exploitation de tomate/concombre en serres chauffées serait attribuée au poste

« chaufferie » et 4 % pour l'irrigation. La répartition peut être affiner puisque seuls les postes de « chaufferie », « irrigation » et « Serre ouvrant » ont été pris en compte dans l'étude.

Mais, cela confirme bien que le poste de « chaufferie » est le plus important en terme de consommation d'énergie électrique (Grisey et Pommier, 2007).

Toujours selon une étude du CTIFL, la consommation d'énergie en production de fraises sous serre chauffée, était en moyenne de 50 kWh/m² par exploitation à l'échelle nationale en 2012 et la consommation électrique est de 3 kWh/m² (Bosc et Grisey, 2014).

Cette électricité est produite en majorité à partir d'énergie provenant de sources fossiles non renouvelables dont le prix ne cesse d'augmenter.

3.3.2 Température et Hygrométrie

La fraise est principalement cultivée sous des climats tempérés car sa température optimale de croissance se situe entre 10°C et 25°C (Ledesma, Nakata, et Sugiyama 2008). La plage de températures favorables à l'induction florale chez le fraisier est entre 7°C et 25°C, elle est sensiblement la même pour le développement des feuilles. Les stolons eux, peuvent se développer à des températures approchant 35°C.

Les fortes températures au-delà de 26°C, ont un effet négatif sur la nouaison, la viabilité du pollen ainsi que sur la floraison (Kadir, Sidhu, et Al-Khatib 2006). Le calibre et la qualité du fruit sont aussi impactés, notamment par une réduction du poids ou encore, par la présence de nombreux akènes verts non développés pouvant se trouver à l'apex des fruits (Ledesma, Nakata, et Sugiyama 2008)

Ces très fortes températures ont tendance à réduire l'activité photosynthétique du plant (Wang et Camp 2000), voir à inhiber sa croissance (Kadir, Sidhu, et Al-Khatib 2006).

De plus, le rendement du fraisier est particulièrement sensible aux écarts de température jour-nuit, effectivement, il a été établi que l'écart de température jour-nuit impacte la floraison et le développement de la plante (Verheul, Sønsteby, et Grimstad 2007). La température de nuit optimale dépend très fortement de la température de jour dominante et *vice versa* (Verheul, Sønsteby, et Grimstad 2007). Les fortes chaleurs en soirée favorisent la respiration de nuit qui n'est pas toujours idéale pour la croissance du plant (Wang et Camp, 2000). En période estivale, les températures jour-nuit recherchées sont respectivement 25/12°C (Balasooriya, Dassanayake, et Ajlouni 2020). Pour des températures jour-nuit supérieures aux optimales et particulièrement pour la température de nuit si au-delà de 18°C, on peut observer une réduction du calibre et du nombre de fruits (Ledesma, Nakata, et Sugiyama 2008).

Un écart de température jour-nuit proche de 25/12°C permet un meilleur transfert des sucres produits lors de la photosynthèse dans les feuilles vers les fruits. On obtient des plantes qui ont une meilleure croissance et des fruits plus chargés en sucrose et qui sont plus rouges, plus brillant (Wang et Camp 2000).

Le taux d'humidité relative compris entre 65-75 % pendant la journée est considéré comme optimal (Lieten, 2002). Une humidité relative plus importante favorise la production de fruits malformés, augmente la partie végétative de la plante et entraîne une réduction de la nouaison (Lieten, 2002). Une humidité relative plus faible a tendance à réduire le poids ainsi que le rendement des fruits. Par contre un taux élevé d'humidité en soirée peut permettre la production de fruit avec un poids important (Lieten, 2002).

3.3.3 Le déficit hydrique (DH)

L'humidité de la serre dépend également fortement des conditions extérieures (précipitation, froid, vent...) et de la quantité d'eau transpirée par les plantes. Une forte humidité dans la serre peut créer de la condensation sur les parois, ce qui a pour effet de diminuer la transmission lumineuse et d'augmenter le risque de maladies fongiques. L'humidité de l'air peut s'exprimer de différentes manières, on peut parler d'humidité relative (HR) qui correspond au rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante. Le déficit hydrique (DH) peut être aussi utilisé, il représente la quantité d'eau que peut encore absorber l'air avant d'atteindre la saturation.

Le DH est un moyen pour connaître, les besoins hydriques de la plante mais aussi le climat de la serre. Le (DH) en tant qu'indice peut être utilisé comme indicateur du développement de la plante mais aussi comme indicateur de conditions propices au développement de maladies sur celle-ci. La maîtrise du DH est donc une étape importante vers la lutte contre les maladies fongiques dans les abris (Prenger et Ling,)

3.4 Irrigation

Les plants produits en condition hors-sol sont souvent exposés à des risques de stress hydrique, étant donné le faible volume de réserve contenu dans les sacs (Klamkowski et Treder, 2008). Or, le fraisier a de forts besoins en eau du fait de son système racinaire superficiel et essentiellement chevelu ce qui le rend sensible à la sécheresse (Grant *et al.*, 2010). Il possède une importante surface foliaire, ainsi qu'une forte teneur en eau dans les fruits (Bergeron, 2010).

L'irrigation du fraisier exige une excellente gestion pour maintenir les conditions hydriques optimales. Un apport insuffisant entraîne un stress hydrique tandis qu'un apport excessif peut entraîner une asphyxie racinaire.

Un stress hydrique chez le fraisier se traduit par une diminution du rendement. Tout comme le rendement, la qualité des fruits est affectée en conditions de stress hydrique. Le calibre des fruits est significativement réduit lors de stress hydrique durant la floraison et le développement des fruits.

4 Serre bioclimatique (outil de production efficient en énergie)

Parmi les nouvelles méthodes de production économes en énergie, on retrouve la serre bioclimatique, qui a pour seule source d'énergie le soleil. Cette énergie permet à la fois de chauffer l'intérieur de la serre et d'apporter la quantité de lumière dont ont besoin les plantes (Gao *et al.*, 2010). Elle permet de réduire considérablement les coûts associés au chauffage (Carroll *et al.*, 2014). Le degré d'exposition détermine les conditions lumineuses de la serre, ces conditions varient selon la saison, la latitude, la structure et des matériaux de la serre (Gao *et al.*, 2010).

4.1 Les serres passives et actives

Il existe deux types de serres bioclimatiques, les serres dites passives et les serres dites actives. Les serres passives peuvent posséder un système de « collecte » d'énergie solaire et/ou de stockage, reposant sur la structure de la serre elle-même ou d'autres matériaux associés comme (l'eau, l'air, des matériaux à changement de phase, une couche rocheuse ou un mur thermique) qui permettent le chauffage de la serre (Santamouris *et al.*, 1994).

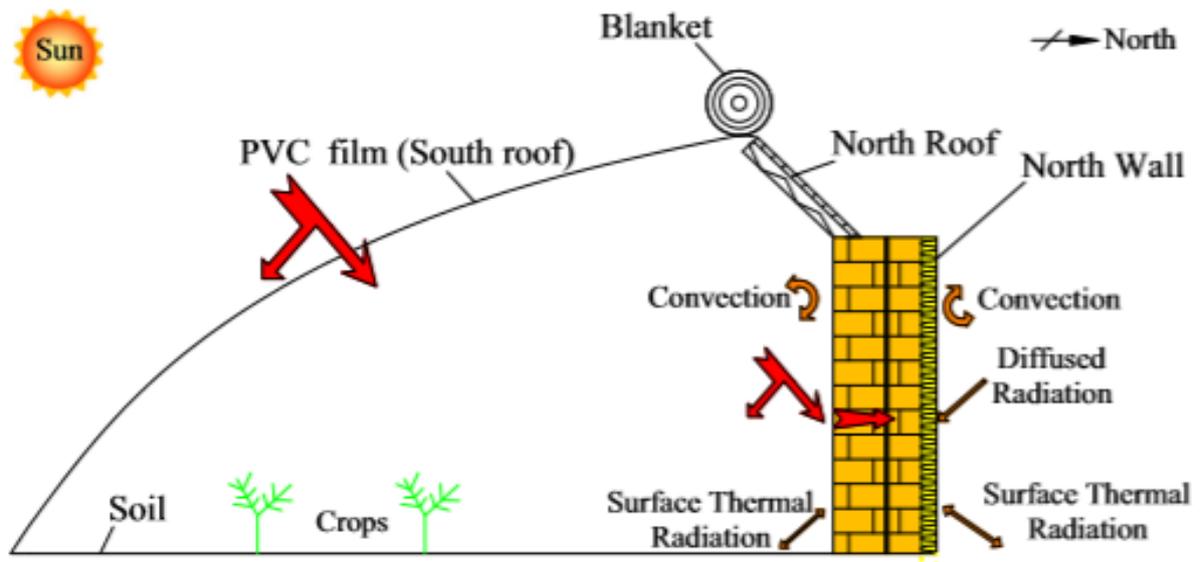


Figure 2 : Schéma d'une serre solaire (Ling et al., 2014)

Les serres actives tout comme les serres passives possèdent un système de « collecte » et de stockage de l'énergie mais indépendant de la serre elle-même (Santamouris *et al.*, 1994).

Dans cette étude, on ne s'intéressera qu'aux serres passives et particulièrement celles utilisant l'eau comme système de stockage. Mais tout d'abord nous ferons une présentation non exhaustive des différentes serres bioclimatiques et cela en commençant par un rappel historique avec la serre solaire chinoise ou Chinese solar greenhouse (CSG). Le premier groupe de CSG a été initialement développé dans les années 1970 dans le nord-est du pays (Zhang *et al.*, 2016). La performance thermique des CSG dépend des conditions climatiques régionales, des paramètres dimensionnels du bâtiment et des matériaux de construction (Deiana et Fabrizio, 2014).

4.2 La serre solaire chinoise ou Chinese solar greenhouse (CSG)

En général, les CSG mesurent entre 50 à 100 m de long. Elles sont faites de murs d'extrémités Ouest et Est en (brique ou terre), d'un toit nord non transparent en matériaux légers (bois, des dalles de béton aéré ou de la paille), d'un mur nord (mur en brique rectangulaire). Le mur côté nord de la serre est fait de matériaux dotés d'un coefficient de stockage thermique relativement élevé pour stocker passivement une grande quantité de chaleur pendant le jour et libérer l'énergie thermique pendant la nuit (Beshada, Zhang, et Boris 2006).

La paroi nord est généralement un mur simple, ce type de murs simples est progressivement remplacé par des murs stratifiés en raison de meilleures propriétés d'isolation thermique (Zhang *et al.*, 2016). Les murs stratifiés sont généralement composés de deux couches, de briques perforées (BP) et de panneaux de polystyrène expansé (PPE). Les BP améliorent l'environnement thermique et retiennent plus de chaleur en raison de leur structure perforée (Zhang *et al.*, 2016).

Enfin on retrouve un toit côté sud, transparent, recouvert d'une couche de film plastique qui permet à l'énergie solaire d'entrer dans la serre pendant la journée. Pendant la nuit, une couverture est posée sur le dessus du film pour réduire la perte de chaleur (Ling *et al.*, 2014). Pendant les journées d'hiver, le rayonnement solaire irradie directement la surface sud du mur, certains rayons sont absorbés, accumulés et conduits dans l'intérieur du mur, et d'autres seront reflétés sur les surfaces de la culture, du sol, du toit sud et du toit nord (Ling *et al.*, 2014). La CSG offre un environnement propice à la production intensive de diverses cultures de légumes, comme la tomate, le poivron et l'aubergine (Cao *et al.*, 2019) (Figure 2).

Il existe différents types de systèmes autres que celui du mur, pour le stockage passif de l'énergie.

4.3 Serre passive avec stockage dans des hydro-accumulateurs

L'eau est considérée comme l'un des meilleurs moyens de stockage de chaleur en raison de sa capacité thermique élevée ($4,2 \text{ kJ/kg.K}^{-1}$) et de son faible coût (Antoniadis, 2015). Son taux d'échange de chaleur élevé pendant le chargement et le déchargement est un avantage (Antoniadis, 2015). Un système à base d'eau stockée est utilisé dans les serres, l'eau est mise dans des boudins en plastique ou des bidons. Les boudins peuvent être placés de façon verticale ou horizontale au sol en inter-rang ou placés le long du mur nord (Santamouris *et al.*, 1994).

Le système d'eau capte le rayonnement solaire incident pendant la journée et pendant la nuit lorsque la température est plus basse, la chaleur stockée est relâchée par convection dans la serre. Ce système de stockage peut servir également d'isolant du côté nord de la serre

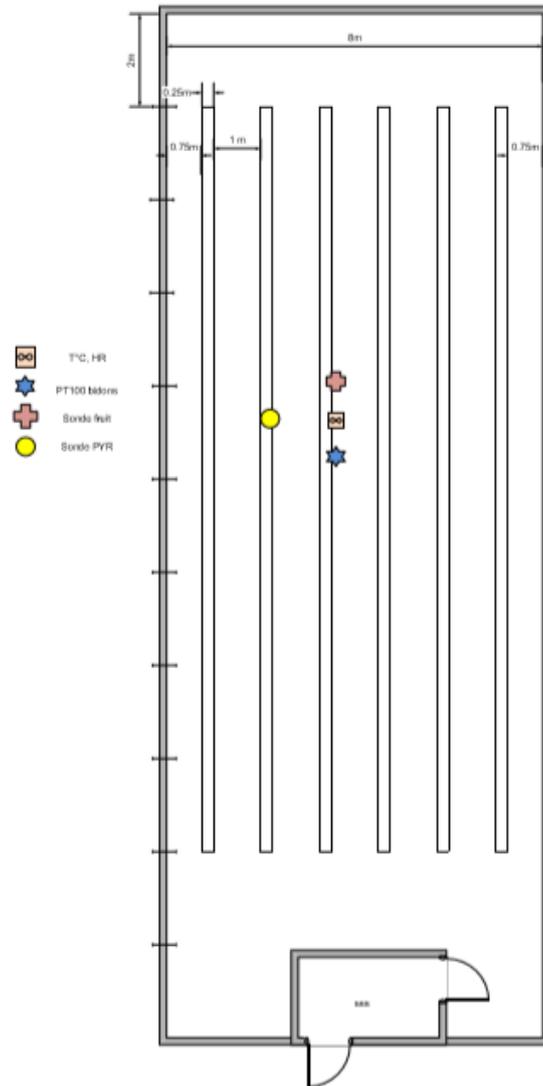


Figure 3 : Plan du tunnel

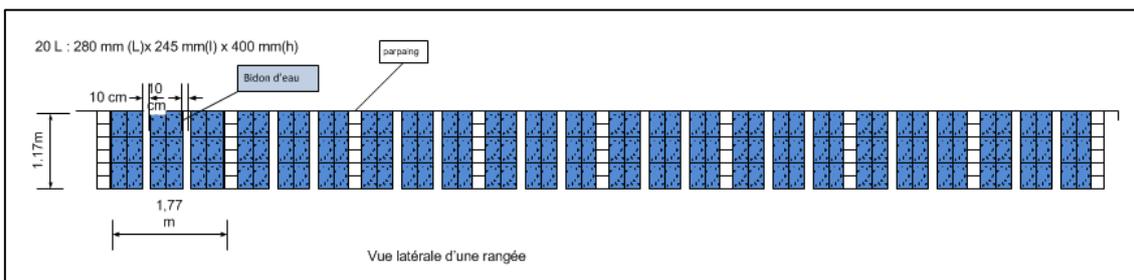


Figure 4 : Dispositif de stockage (coupe transversale)

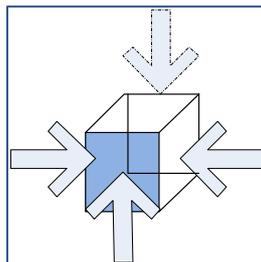


Figure 5 : Dispositif de stockage (coupe horizontale)

(Santamouris *et al.*, 1994). En été, l'air chaud de la serre est refroidi par le système et cela permet d'abaisser la température dans la serre. Les bidons et boudins peuvent être de différentes couleurs, ils peuvent être recouverts d'isolant en polycarbonate peint en blanc pour réfléchir les rayons et abaisser la température, tout en protégeant les plants des rayonnements (Santamouris *et al.*, 1994). Ils peuvent aussi être peints en noir pour absorber plus de chaleur en hiver (Carroll *et al.*, 2014).

Avec ce système, on obtient une température de serre supérieure de 2-3°C à celle de l'extérieure (Santamouris *et al.*, 1994).

Des couleurs comme le rouge ou le bleu peuvent être utilisées sur les bidons ou boudins pour permettre de réfléchir la lumière dans les spectres actifs de la photosynthèse. Dans ce dernier cas, ils doivent être disposés à différents endroits de la serre pour réduire le phénomène de phototropisme (Carroll *et al.*, 2014). Tout comme l'eau, il existe des matériaux capables de stocker de la chaleur et qui peuvent servir dans le chauffage d'une serre.

4.4 Serre passive utilisant des PCM comme matériel de stockage

Ces matériaux ont la propriété particulière de changer de phase, lorsqu'ils emmagasinent et se déchargent de chaleur. Il s'agit de matériaux qui en changeant d'état captent ou libèrent de l'énergie. La chaleur est absorbée par le matériau puis stockée pour une utilisation ultérieure (Benli et Durmuş 2009). Parmi ces matériaux, on retrouve les matériaux à changement de phase (PCM) qui sont capables de stocker de l'énergie lorsqu'ils se réchauffent et s'approchent de leur point de fusion. Ce sont des matériaux qui passent d'un état liquide-visqueux à solide et cela à des températures généralement comprises entre 15 et 45 °C (Benli et Durmuş 2009).

5 Matériels et Méthodes

L'essai vise à équiper un tunnel bioclimatique afin de stocker l'énergie solaire de la journée, par le biais d'hydro-accumulateurs (bidons noirs) disposés sous les gouttières. L'énergie captée par rayonnement et par conduction thermique la journée sera restituée la nuit. Les périodes de journée (jour) et soirée (nuit) sont définies selon l'ordinateur climatique. Cette définition de lever et coucher du soleil permettra de réaliser des analyses statistiques sur ces périodes. Le climat et le développement des cultures de fraise seront observés dans trois tunnels (le tunnel bioclimatique double paroi (TBC), le tunnel simple paroi (TSP) de référence, et le tunnel double paroi (TDP) de référence). L'objectif étant d'obtenir une floraison précoce mais postérieure au 15 janvier dans le tunnel bioclimatique ainsi qu'un maintien d'une température élevée le jour (22°C).

5.1 Dispositif expérimental

L'essai est réalisé dans des tunnels de 176 m² dont 128 m² de culture (Figure 3). La partie culture est composée de 6 gouttières de 16 m de long supportées au sol par 6 parpaings de 19,5 cm de hauteur (Figure 4). La hauteur des tunnels est de 2,86 m.

Pour le tunnel bioclimatique, le stockage de l'énergie est réalisée dans des bidons de 20 L dont la dimension est la suivante (Figure 5) : 280 mm (L) x 245 mm (l) x 400 mm (h),

-Surface 1 : $L \times h = 0,112 \text{ m}^2$, Surface 2 : $l \times h = 0,098 \text{ m}^2$.

Les bidons de 20 L permettent d'avoir une stratification plus limitée que dans un bidon de plus grand volume et d'augmenter la surface d'échange.

Tableau 2 : Consigne d'aération pour les 3 tunnels

STADES	AERATION	
	Nuit	Jour
Départ végétation	28°C	28°C
En végétation jusqu'à floraison	28°C	28°C
A la floraison	28°C	28°C
Maturation	22°C puis 13°C dans le TBC et 17°C dans le TDP, à partir de la semaine 19	22°C



Figure 6 : Exemple de fruit déformé (Ciflorette)



Figure 7 : Exemple de fruits pourris (Ciflorette)

Par rangée de culture, nous avons 144 bidons répartis entre les parpaings pour constituer 8 blocs de stockage d'eau. Il y aura donc 18 bidons par bloc (Figure 4). Les bidons sont espacés de 10 cm environ, ce qui permettra d'augmenter la surface d'échanges. Au total, le dispositif compte 864 bidons.

Les tunnels simple et double paroi sont exactement les mêmes que le tunnel bioclimatique à l'exception qu'ils ne possèdent pas d'hydro-accumulateurs.

5.2 Energie stockée

L'énergie accumulée dans les hydro-accumulateurs résulte de trois facteurs principaux qui sont les conditions météorologiques extérieures (ensoleillement et température), la quantité d'énergie solaire (rayonnement) entrant dans le tunnel et dans ce cas des différentes propriétés des bidons (propriétés non évoquées dans ce travail).

L'énergie stockée dans les bidons sera déterminée à partir de la température de bidon et obtenue selon la formule suivante : $\epsilon_b = V \cdot C_p \cdot \Delta T$

Avec (ϵ_b) représentant l'énergie stockée dans les bidons en (Wh/m²)

V qui représente le volume total d'eau dans les bidons en (m³)

ΔT qui représente le différentiel de température dans les bidons (température la plus basse à partir du lever de soleil – la température la plus haute de la période avant le coucher du soleil) en (°C) ce qui correspond à la phase de charge des réservoirs.

C_p : Capacité de l'eau : 1,16 kWh/m³.K

5.3 Les variétés de fraises

Les variétés de fraises choisies sont la variété Clery, la variété Gariguette et, la variété Ciflorette. La Gariguette, variété précoce qui possède une productivité et une vigueur moyenne, des fruits allongés, qui peuvent se déformer, qui sont sensibles aux coups de chaleur et à l'oïdium.

La Gariguette a une remontée tardive et est plus sensible que la Ciflorette. La Ciflorette, variété précoce qui possède une productivité moyenne et une bonne vigueur. Des fruits allongés, biconiques, sensibles à l'oïdium et au dessèchement des sépales. Possède une bonne remontée et une meilleure tenue après récolte que Gariguette.

La Clery, variété précoce aux fruits allongés et coniques. Les fruits ont un calibre régulier. Clery possède un feuillage dense et est sensible au botrytis.

Les plants de fraisiers choisis sont des trayplants, plantés en 2019, semaine 50. La culture se fait en sacs de 50 cm, substrat : mélange tourbe 60 % d'écorce de pin 40 % (S6/16Dumona).

L'implantation des différentes variétés dans les tunnels est la même (Annexe 8)

Le nombre de plants par bac est de 5 soit 10 plants/mètre linéaire, le suivi phytosanitaire est fait en protection raisonnée, la pollinisation par des apports de bourdons et les consignes chauffage - aération sont détaillées dans le (Tableau 2).

Les fraises sont récoltées à la main tous les Mardi et Jeudi de chaque semaine, un tri est réalisé entre les fruits commercialisables et non. Tous les fruits sont pesés, les fruits commercialisables répondent aux qualités citées plus haut. Dans les fruits non commercialisables, on trouve les fruits pourris, malformés, de petite taille et/ou non matures tombés (Figures 6 et 7).



Figure 8 : Sonde de fruit

5.4 Matériel de mesure

Dans chaque tunnel on retrouve des capteurs de température et d'hygrométrie (Figure 3 de type Hygrosmart Michell, modèle I7000XP ayant une précision de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1,5\%$ HR à 23°C) et sont positionnées en complément des sondes de l'ordinateur Hoogendoorn. Une mesure de rayonnement solaire PYR (Figure 3) et d'énergie sont obtenues à l'aide d'un pyranomètre, de type SKYE Instrumental, modèle SKS 1110 avec une incertitude de 5% sur les mesures.

En plus dans le tunnel bioclimatique, des sondes de température (Figure 3) sont placées dans les bidons afin de calculer l'énergie stockée. Des sondes de température de fruit sont placées dans les tunnels bioclimatique et dans le tunnel simple paroi de référence (Figures 8). Pour les sondes de bidons et de fruits, il s'agit de thermocouple flexible de type K en (soie de verre) du fabricant Testo qui possède une précision de Classe 2 selon la norme EN 60584-2.

5.5 Etude de risque de condensation

Si un corps d'une température inférieure à la température de rosée de l'air humide est placé dans celui-ci, il y a condensation sur ce corps. La température de rosée est obtenue grâce à la formule suivante : $T_R = HR^{1/8} \times (112 + (0,9 \times T_h)) + 0,1 \times T^{\circ} - 112$

Les températures de fruits seront donc comparées aux températures de rosée correspondantes afin de voir s'il y a des risques de condensation sur ceux-ci. Un risque de condensation sera déterminé lorsque la température de rosée sera supérieure ou égale de 2°C à la température de fruit. Ainsi des plages horaires à risque dans le mois pourront être déterminées. Dans les tunnels, l'aération se fait uniquement par les ouvrants situés au niveau du faitage, les consignes d'aération sont les mêmes pour les trois tunnels sauf lors de la maturation, où on a aéré différemment (Tableau 2).

5.6 Etude du risque de surchauffe

L'exposition à des températures élevées peut provoquer des modifications morphologiques, anatomiques, physiologiques et biochimiques des tissus végétaux et par conséquent, peut affecter la croissance et le développement de différents organes végétaux. La température est l'un des facteurs les plus importants qui affectent l'absorption des nutriments par le fraisier (Palencia *et al.*, 2013). Des températures élevées supérieures à 25°C , réduisent la formation des fleurs de fraises et la qualité des fruits (Palencia *et al.*, 2013).

Nous avons donc voulu voir si dans les différents tunnels nous avons des températures inférieures à 7°C et supérieures 25°C qui représentent des conditions de culture non propices au bon développement du plant. Nous avons donc un écart de températures important pour des conditions propices.

Pour la remontée les températures de nuit conseillées ne doivent pas excéder 15°C , il a été observé que le rendement était meilleur pour un printemps avec des nuit fraîches selon Jean-Philippe Bosc (CTIFL).

5.7 Formules

Afin d'étudier l'humidité dans l'air, nous avons utilisé la notion de déficit hydrique, qui représente la quantité d'eau que peut encore absorber l'air avant d'atteindre la saturation.

Il se calcule à partir de la pression atmosphérique totale (P_{tot}) en kPa, de la pression de vapeur à saturation (P_{vs}) en kPa et de la teneur en eau (r) par (g) d'eau par (kg) d'air sec.

$$DH = 0,622 \times 1000 \times \left(\frac{p_{vs}}{(p_{tot} - p_{vs})} \right) - r$$

Ptot sera considérée comme étant une constante (101,3 kPa)

S : la surface de totale du tunnel (m²)

L'énergie solaire reçue par le tunnel est déterminée en faisant la somme du rayonnement global horaire (J/cm²) et en le convertissant en kWh/m².

Selon la formule suivante : $E_r = \left(\left(\frac{\sum(RGh)}{3600} \right) \times \frac{1}{10^4} \right) \times 10^{-3}$

Er qui représente l'énergie reçue est en (J/cm²)

RGh qui représente le rayonnement global entrant dans le tunnel est en (W/m²)

L'énergie solaire entrant dans le tunnel est déterminée en faisant la somme du rayonnement global divisé par 1000 pour l'exprimer en kWh et multiplié par le temps. Dans l'étude le pas de temps d'enregistrement des données climatiques était de 6 minutes

5.8 Traitement de données

Pour les données de température, d'hygrométrie, et de rayonnement global, des moyennes horaires ont été réalisées. La comparaison de toutes ces données se fait sous forme d'analyses statistiques sous le logiciel R studio (Annexe1) et de graphiques Excel. La température d'air, le déficit hydrique et l'énergie stockée dans les bidons ont été étudiée (test de Mann Whitney Wilcoxon). L'étude du climat s'est faite entre le 3 Février 2020 et le 24 Juin 2020, et le rendement entre le 5 Mars et le 24 Juin 2020.

Le rendement a été étudié pour chaque tunnel et par variété, comparé deux à deux à l'aide d'une ANOVA. Un test ANOVA a été réalisé pour déterminer s'il y a un effet significatif des conditions climatiques du tunnel bioclimatique sur le rendement.

Les étapes de l'ANOVA :

- 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.

Tableau 3 : Résumé des températures de journée (Février-Juin)

Mois	Environnement	Température Moyenne	Température Maximum	Température Minimum
Février	TBC	20,9°C	27,9°C	11,4°C
	TSP	19,6°C	28,7°C	4,7°C
	TDP	19,5°C	28,0°C	5,6°C
	Extérieur	15,5°C	23,6°C	1,25°C
Mars	TBC	21,1°C	29,5°C	12,0 °C
	TSP	20,3°C	29,1°C	5,9°C
	TDP	19,9°C	28,7°C	7,0°C
	Extérieur	13,1°C	23,9°C	1,2°C
Avril	TBC	22,2°C	30,3°C	15,03°C
	TSP	21,5°C	33,9°C	7,0°C
	TDP	21,9°C	31,7°C	8,1°C
	Extérieur	14,7°C	23,9°C	1,7°C
Mai	TBC	25,2°C	34,9°C	16,8°C
	TSP	25,1°C	34,1°C	15,1°C
	TDP	24,9°C	34,0°C	15,4°C
	Extérieur	19,9°C	29,8°C	9,0°C
Juin	TBC	27,4°C	36,4°C	20,9°C
	TSP	26,6°C	35,4°C	17,1°C
	TDP	26,2°C	35,3°C	17,5°C
	Extérieur	23,1°C	35,4°C	15,3°C

Tableau 4 : Résumé des températures de soirée (Février-Juin)

Mois	Environnement	Température moyenne	Température Maximum	Température Minimum
Février	TBC	15,2°C	21,2°C	11,3°C
	TSP	10,5°C	18,5°C	4,9°C
	TDP	11,2°C	19,0°C	5,8°C
	Extérieur	8,3°C	18,5°C	-0,4°C
Mars	TBC	16,9°C	22,7°C	12,1°C
	TSP	11,3°C	18,5°C	4,4°C
	TDP	11,9°C	18,6°C	5,5°C
	Extérieur	8,4°C	18,5°C	0,5°C
Avril	TBC	20,4°C	31,6°C	14,8°C
	TSP	14,2°C	20,9°C	6,9°C
	TDP	15,1°C	20,9°C	8,2°C
	Extérieur	20,0°C	21,4°C	1,6°C
Mai	TBC	21,8°C	30,7°C	16,3°C
	TSP	18,5°C	28,0°C	13,3°C
	TDP	18,7°C	27,8°C	13,5°C
	Extérieur	18,1°C	29,6°C	10,0°C
Juin	TBC	21,9°C	28,8°C	17,5°C
	TSP	19,7°C	26,7°C	14,7°C
	TDP	19,3°C	26,5°C	15,0°C
	Extérieur	17,4°C	25,2°C	11,9°C

6 Résultats

6.1 Résultats de l'étude du climat

6.1.1 Température de journée et soirée

L'un des objectifs du (TCB) est de restituer la chaleur accumulée le jour pendant la soirée et ainsi augmenter la température du tunnel. L'étude du climat est scindée selon les deux floraisons des fraisières (Février-mi-Mai et mi-Mai-24 Juin). Nous avons donc voulu voir si la température de journée et nuit dans le (TBC) était plus importante par rapport aux autres tunnels. Les données des températures sont dans les Tableaux 3 et 4.

La période de jour est comprise entre (7H-16H) en Février, dans le (TBC) nous avons 20,9°C en journée, une température supérieure à celles autres. Toutes les moyennes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Ensuite sont comparées les températures moyennes de soirée de Février, on constate que la température moyenne de nuit du TBC qui est de 15,20°C et est supérieure à celle du TSP, du TDP et à celle de l'extérieur qui sont respectivement de 10,6°C, 11,22°C et 8,2°C. Les moyennes de températures de soirée étant significativement différentes au seuil de 5%.

Les températures de journée et celles de soirée sont comparées pour le TBC, on constate que la température moyenne de journée est supérieure à celle de soirée. Les températures étant significativement différentes au seuil de 5 %.

Les températures de Mars sont légèrement supérieures à celles du mois de Février. La période de jour est comprise entre 7H-17H. La température moyenne de jour du TBC est de 21,13°C, soit supérieure à celles du TSP, du TDP et de l'extérieur. Les moyennes de températures étant significativement différentes au seuil de 5 % sauf entre celles du TBC et TSP.

Ensuite sont comparées les températures moyennes de soirée, le TBC a une température moyenne de 16,9°C soit supérieure à celles du TSP de 5,5°C, à celle du TDP de 5°C et celle de l'extérieure de 8,5°C. Toutes les moyennes sont significativement différentes au seuil de 5%.

On compare maintenant la température de journée et celle de soirée pour le mois de Mars. On constate qu'il y a une différence significative entre les moyennes au seuil de 5%.

Pour le mois d'Avril, la température moyenne de journée est supérieure à celles des précédents mois. La période de jour est comprise entre 5H-18H. Nous avons une température moyenne de journée pour le TBC de 22,2°C, supérieure à celle du TSP, du TDP et à celle de l'extérieure. Dans ce cas, seules les moyennes entre le TBC et l'extérieur sont significativement différentes au seuil de 5%.

Les températures de soirée sont comparées, celle du TBC est supérieure à celle des autres tunnels ainsi qu'à celle de l'extérieur. Toutes les comparaisons étant significativement différentes au seuil de 5 %. Enfin nous avons comparé les températures de jour et de soirée du TBC pour Avril. La température moyenne de journée est toujours supérieure à celle de soirée. De plus les moyennes de température sont significativement différentes au seuil de 5 %.

Pour le mois de Mai, la température moyenne de jour du TBC est de 25,2°C, supérieure à celles des températures des mois précédents. La période de jour est comprise entre 4H-16H.

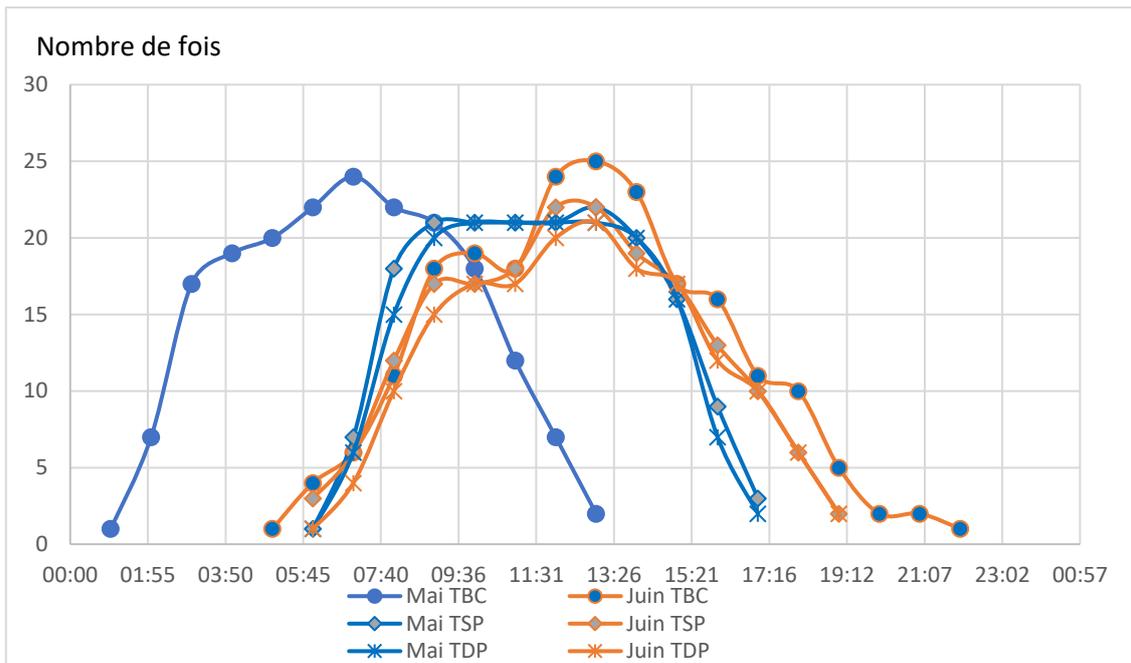


Figure 9 : Période à risque de surchauffe en Mai et Juin

Tableau 5 : Période de surchauffe (Février-Juin)

Mois	Tunnel	Nombre de fois où les températures sont inférieures ou égales à 7°C	Nombre de fois où les températures sont comprises entre 7-25°C	Nombre de fois où les températures sont supérieures à 26°C
Février	TBC	0	632	4
	TSP	53	574	4
	TDP	18	628	4
Mars	TBC	0	728	7
	TSP	18	700	9
	TDP	8	715	5
Avril	TBC	0	396	22
	TSP	2	636	39
	TDP	0	664	29
Mai	TBC	0	504	192
	TSP	0	531	180
	TDP	0	541	171
Juin	TBC	0	323	213
	TSP	0	333	184
	TDP	0	355	170

Les températures de jour des tunnels sont presque les mêmes, elles sont par contre supérieures à celles de l'extérieur 5 °C. Toutes les températures moyennes des tunnels ne sont pas significativement différentes par contre significativement différentes de celles de l'extérieur au seuil de 5 %.

La température moyenne de nuit du TBC est de 21,8°C plus importante que celles des autres tunnels et celui de l'extérieur. Toutes les températures étant significativement différentes au seuil de 5 %. Enfin sont comparées les moyennes des températures de journée et de soirée pour Mai. La température de journée est toujours supérieure à celle de nuit. Les températures moyennes étant significativement différentes au seuil de 5 %.

Pour le mois de Juin, les températures de journées sont très hautes. La période de jour est comprise entre 5H-18H. Nous avons une température moyenne de 27,4°C dans le TBC, température qui est légèrement supérieure à celles des autres tunnels mais aussi à celle de l'extérieur. Toutes les moyennes de températures étant significativement différentes au seuil de 5%. La température moyenne de nuit du TBC est de 21,9°C, soit supérieure à celles des autres tunnels et de l'extérieur. Toutes les moyennes de températures étant significativement différentes au seuil de 5%.

Enfin sont comparées les moyennes des températures de journée et de soirée pour Juin. La température de jour est toujours supérieure à celle de nuit. Les températures moyennes étant significativement différentes au seuil de 5 %.

6.2 Période à risque de surchauffe dans les tunnels

Entre Février et Juin, pour le TBC on ne compte aucune température horaire inférieure à 7°C, mais pour le TDP on en compte 26 heures et 73 heures pour le TSP .

Entre Février et Juin, pour le TBC on comptabilise 438 heures où la température horaire est supérieure à 26 °C (Tableau 5).

Sur la période (Février-Juin), pour une plage horaire donnée, on considère que le nombre d'heures où la température est supérieure à 26°C est importante lorsque le nombre d'heures est supérieure à 10H. Ce nombre d'heures n'est atteint qu'en Mai et Juin pour les différents tunnels. Pour le TBC, la plage horaire est comprise entre 3H et 11H, entre 7H et 16H pour le TSP et entre 8H et 15H pour le TDP pour le mois de Mai. En Juin, la plage horaire se situe entre 8H et 17H pour les trois tunnels (Figure 9). On constate que la température est très élevée dans le TBC et très tôt dans la journée pour le mois de Mai.

Tableau 6 : Résumé DH journée (Février-Juin)

Mois	Tunnel	DH Moyen	DH Maximum	DH Minimum
Février	TBC	6,1	19,3	0,7
	TSP	5,6	18,2	0,4
	TDP	6,9	15,2	0,4
Mars	TBC	6,5	17,1	0,4
	TSP	7,1	21,5	0,9
	TDP	6,4	23,3	0,8
Avril	TBC	9,9	26,9	1,3
	TSP	10,0	25,5	1,2
	TDP	9,5	24,5	0,9
Mai	TBC	10,1	6,7	0,5
	TSP	10,1	4,9	0,7
	TDP	9,7	5,2	0,4
Juin	TBC	12,5	28,9	1,8
	TSP	12,0	28,0	1,3
	TDP	12,0	27,1	0,9

Tableau 7 : Résumé DH soirée (Février-Juin)

Mois	Tunnel	DH Moyen	DH Maximum	DH Minimum
Février	TBC	2,6	7,0	0,7
	TSP	1,8	6,7	0,8
	TDP	1,5	11,3	0,4
Mars	TBC	3,2	12,7	0,9
	TSP	3,6	13,7	0,7
	TDP	1,8	8,6	0,7
Avril	TBC	4,4	11,9	0,9
	TSP	3,2	11,5	1,0
	TDP	3,1	11,2	0,7
Mai	TBC	2,1	26,9	1,3
	TSP	1,5	25,5	1,2
	TDP	0,98	24,5	0,9
Juin	TBC	5,1	14,2	1,1
	TSP	3,8	13,4	1,2
	TDP	4,2	15,4	0,3

6.3 Déficit hydrique (DH) de journée et soirée

Comme dit précédemment dans l'étude de la température l'un des objectifs du dispositif bioclimatique est de restituer le soir, la chaleur accumulée pendant la journée. Cette chaleur permet de diminuer l'humidité ambiante dans le tunnel.

Les données des DH sont dans les Tableaux 6 et 7.

En Février nous avons un DH de journée de 6,1 dans le TBC, un DH de 5,6 pour le TSP et un DH de 6,9 pour le TDP. Les moyennes de DH ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

En soirée nous avons un DH moyen dans le TBC de 2,6, qui est supérieur à celui des autres tunnels. Tous les DH moyens sont significativement différents au seuil de 5 %. Enfin nous avons voulu voir comparer le DH journée et soirée du TBC, le DH moyen de journée est supérieur à celui de soirée. Les moyennes de DH étant significativement différentes au seuil de 5 %.

Pour le mois de Mars nous avons un DH moyen de journée qui est de 6,5 dans le TBC, supérieur à celui du TDP qui est de 6,3 mais inférieur à celui du TSP. Les DH moyens ne sont pas significativement différents les uns des autres au seuil de 5 %.

En soirée le TBC possède un DH moyen de 3,2, supérieur à celui du TDP mais inférieur à celui du TSP. Les DH moyens étant significativement différents au seuil de 5 %.

Enfin nous avons comparé le DH de journée et de soirée du mois de Mars pour Le TBC, le DH de journée est supérieur à celui de soirée, les DH étant significativement différents au seuil de 5 %.

En Avril le DH moyen de journée du TBC est de 9,9 soit 0,42 de plus que celui du TDP, mais inférieur à celui du TSP qui est de 9,95. Aucune comparaison de moyenne de DH n'est significativement différentes au seuil de 5%.

En soirée nous avons un DH moyen en TBC qui est de 4,4 supérieur à celui des autres tunnels. Le TSP possède un DH moyen de 3,2 et le TDP de 3,1.

Enfin, nous avons comparé le DH de journée et de soirée pour le Avril pour le TBC, on constate qu'il y a bien une différence significative entre les deux moyennes au seuil de 5 %.

Pour le mois de Mai nous avons un DH moyen de 10,1 en journée pour le TBC, de 10,1 pour le TSP et de 9,7 pour le TDP. Il n'y a pas de différence entre les moyens de DH au seuil de 5 %.

Contrairement à la journée, en soirée le DH est significativement différent pour toutes les comparaisons au seuil de 5 %.

Il y a une de différence entre le DH journée et DH soirée pour le TBC en Mai toujours au seuil de 5 %.

Pour le mois de Juin, nous avons un DH moyen de jour de 12,5 dans le TBC, DH qui est légèrement supérieur à celui des autres tunnels. Les moyennes de DH ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

En soirée le DH est beaucoup plus faible, il est de 5,08 dans le TBC, supérieur à celui des autres tunnels. Les moyennes de DH sont significativement différentes au seuil de 5 %. Il y a bien une différence entre le DH jour et nuit TBC.

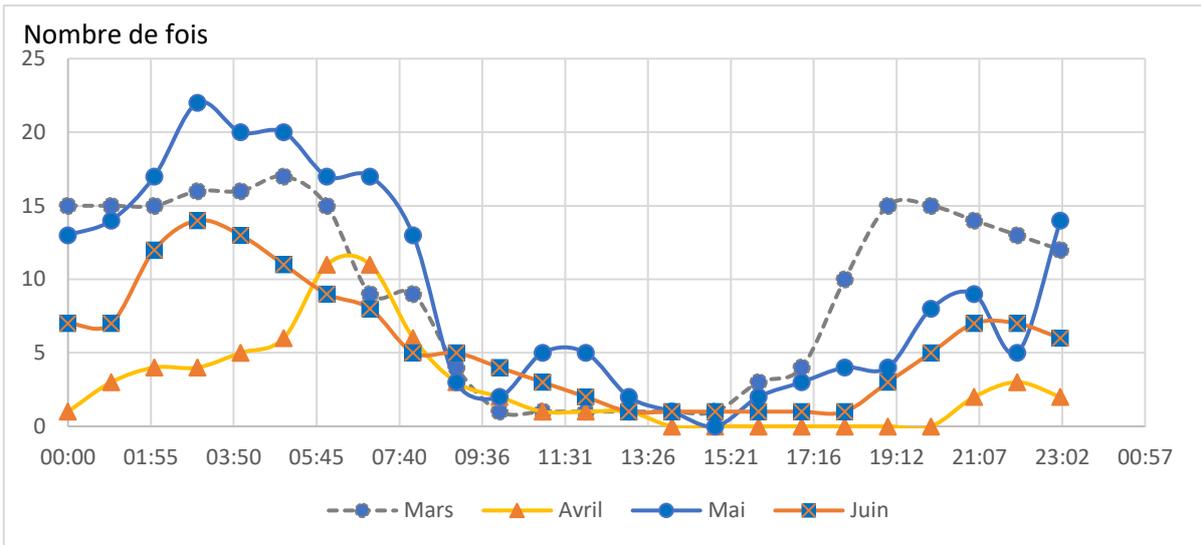


Figure 10 : Nombre d'heures à risque de condensation dans le TBC (Mars-Juin)

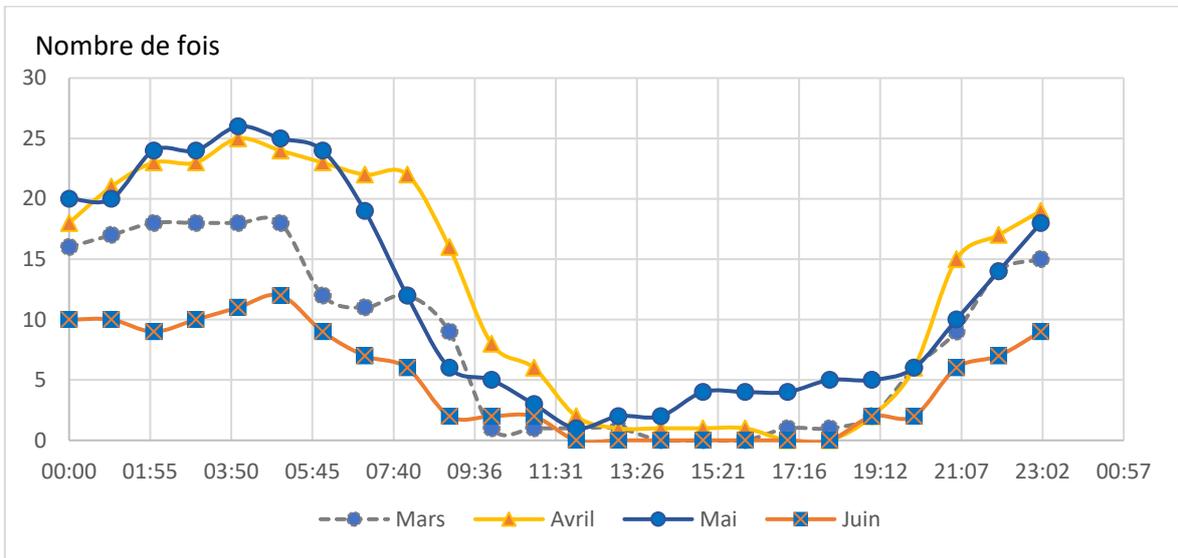


Figure 11 : Nombre d'heures à risque de condensation dans le TSP (Mars-Juin)

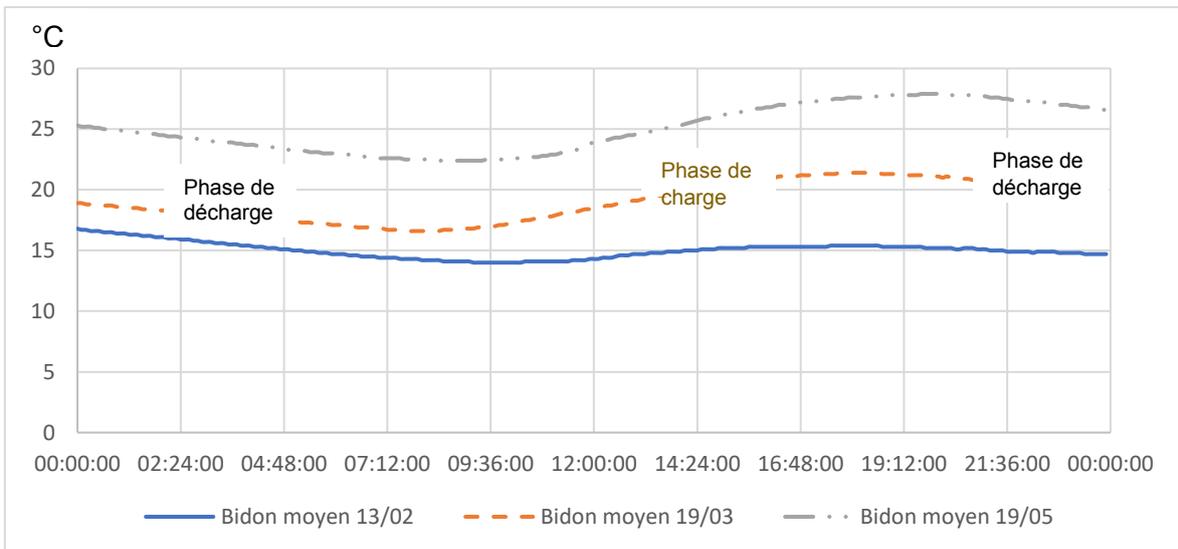


Figure 12 : Exemple de fonctionnement du bidon en fonction de la température pour 3 jours

6.3.1 Périodes à risque de condensation

En plus de l'étude sur la température d'air et le déficit hydrique, nous avons voulu observer l'effet du dispositif bioclimatique sur la condensation. A partir de la température de fruit nous avons établie des plages horaires à risque de condensation. Si la température de rosée est supérieure ou égale à la température de fruit moins 2°C alors on considère qu'il y a un risque de condensation. Des sondes de fruits ont été placées sur les fraises pour déterminer leur température. Dans le TBC pour le mois de Mars nous avons 223 heures qui présentent un risque, en Avril nous avons 66 heures, en Mai 220 heures et en Juin 134 heures. Sur la période (Mars-Juin), pour une plage horaire donnée, on considère que le risque de condensation est important pour plage horaire lorsque le nombre d'heure à risque est supérieur à 10 heures. Deux intervalles journalier peuvent être déterminés où les risques sont les plus importants, (00H-8H) et (18H-23H) pour le TBC (Figure 10) et (00H-9H) et (21H-23H) pour le TSP (Figure 11). Sur la période d'étude nous avons plus d'heures à risque de condensation dans le TSP que dans le TBC soit 896 heures et 643 heures respectivement.

De l'oïdium a été observé dans les tunnels, de façon plus importante dans le TBC et le TDP que dans le TSP. Une étude épidémiologique aurait pu être faite pour déterminer le taux de contamination dans chaque tunnel et ainsi déterminer l'effet réel du TBC sur le développement de pathogènes.

6.4 Energie stockée dans le système bioclimatique

Le dispositif bioclimatique qui est composé d'hydro-accumulateur (bidons noirs) remplis d'eau, permet le stockage et la restitution de la chaleur accumulée pendant la journée en soirée.

En journée, pendant la phase de stockage, les rayons solaires sont piégés dans les hydro-accumulateurs et l'énergie est stockée sous forme de chaleur (eau chaude). La nuit lorsque la température ambiante du tunnel est inférieure ou égale à celle des hydro-accumulateurs, la phase de déstockage se met en place. L'énergie accumulée est libérée sous forme de chaleur par convection et par rayonnement ce qui permet de réchauffer l'air ambiant, d'augmenter la température et le déficit hydrique.

Avec un ciel couvert et une température faible, peu de rayonnements solaires arrivent au tunnel et très peu entrent dans celui-ci. De ce fait en il y a très peu d'énergie stockée et restituée par les hydro-accumulateurs (0,1-0,3 kWh/m²) la température de l'eau des bidons est faible (courbe du 13/02 Figure 12). En revanche lorsque le ciel est dégagé (journée ensoleillée) avec une température moyenne (12°C-18°C), beaucoup d'énergie est stockée et restituée par les hydro-accumulateurs (0,4-0,6 kWh/m²) (courbe du 19/03 Figure 12).

Lors d'une journée ensoleillée, avec une température extérieure proche de 25°C, la température de bidon est importante (courbe du 19/05 Figure 12),l'énergie stockée par les hydro-accumulateurs est de 0,65 kWh/m².

Lorsque le ciel est dégagé et la journée ensoleillée, on distingue bien les phases de charge et de décharge des bidons (journée du 19/03 et 19/05 Figure 12), lorsque le ciel est couvert ces phases sont peu marquées (journée du 13/02 Figure 12).

La quantité d'énergie stockée par les bidons pour la période de (Janvier-Juin) a été déterminée, de Janvier à Mars on passe de 8,3 kWh/m² à 13,2 kWh/m² soit 2-3 kWh/m² en plus par mois. Entre Mars et Mai on passe de 13,2 kWh/m² à 14,5 kWh/m² avec une légère baisse en Avril à 12,1 kWh/m² et enfin en Juin on a 12,3 kWh/m².

Tableau 8 : Suivi de la quantité d'énergie stockée (Janvier-Juin)

	TOTAL			% de répartition des kWh selon étages des bidons		
	kWh	kWh/m ²	kWh/m ² .j	Bas	Milieu	Haut
Janvier	1469,3	8,3	0,3	29%	31%	40%
Février	1983,8	11,3	0,4	30%	30%	39%
Mars	2328,5	13,2	0,4	29%	31%	40%
Avril	2138,1	12,1	0,4	30%	31%	39%
Mai	2549,7	14,5	0,5	32%	32%	37%
Juin	2164,8	12,3	0,5	34%	31%	34%
TOTAL	12634,2	71,8	2,5	31%	31%	38%

Tableau 9 : Résumé récolte 1ère Floraison

Récolte 1ère floraison					
Variété par Tunnel	Date 1ère récolte	Rendement commercial (g/plant)	Déchet (%)	Poids moyen commercial (g/fruit)	Nombre moyen de fruits commercialisables
Ciflorette TBC	07-mars	360,1	22,9%	357,8	31
Clery TBC	05-mars	330,2	12,8%	328,4	24,3
Gariguette TBC	04-mars	363,7	17,7%	363,7	28,2
Total TBC		351,4	17,8%	350	27,8
Ciflorette TSP	16-mars	595,7	13,8%	595,7	42,9
Clery TSP	12-mars	596,2	7,8%	549,6	34,6
Gariguette TSP	13-mars	616,5	7,0%	616,5	42,8
Total TSP		602,8	9,5%	587,3	40,1
Ciflorette TDP	10-mars	524,3	11%	524	37,8
Clery TDP	09-mars	461,3	6,0%	461,3	30,2
Gariguette TDP	09-mars	515,1	7,0%	515,1	34,9
Total TDP		500,2	8,1%	500,2	34,3

On peut donc dire qu'à partir de Mars, avec l'allongement de la durée de jour et des températures plus importantes, on n'accumule pas davantage d'énergie, il existe donc un seuil de stockage.

On constate également que l'étage du haut accumule le plus d'énergie et que celui du bas le moins sûrement dû des déperditions par le sol (Tableau 8).

6.5 Étude de rendement

Pour l'étude de rendement nous avons décomposé ce dernier en trois phases, selon la floraison, première et seconde floraison (remontée) de production et enfin le rendement final. Les variables étudiées pour ce rendement sont : le tunnel, la variété, le rendement commercial (g/plant), le pourcentage de déchet, le nombre de fruit/plant et l'indice de précocité.

Les résultats de l'étude de rendement se trouvent dans les tableaux 9,10 et 11. Les résultats statistiques dans les annexes 2 et 3.

6.5.1 Première floraison (PF)

6.5.1.1 Précocité

Il y a une précocité marquée mais non significative dans le tunnel bioclimatique (TBC), 1-2 semaine(s) de précocité dans le (TBC) par rapport au TDP et 2 à 3 semaines de précocité par rapport au TSP selon les variétés. Les variétés précoces sont Clery et Ciflorette. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés au seuil de 5 % avec des p-values respectives de 0,60 et 0,48. Avec les résultats de l'ANOVA, on constate bien qu'il y a un effet variétal, de tunnel, d'interaction (tunnel*variété) très significatif et un effet bloc significatif. Avec le test de Newman-Keuls, on constate qu'il n'y a aucune variétés et aucuns tunnels qui se distinguent au seuil de 5 %.

6.5.1.2 Nombre de fruits commercialisables

Selon l'analyse de variance (ANOVA), il y a bien un effet significatif des facteurs variété et tunnel sur la production de fruit. Par contre il n'y a pas d'effet d'interaction entre ces facteurs, ni d'effet bloc au seuil de 5 %. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,055 et 0,56. Le test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 %, nous permet de dire que la variété Clery a moins produit de fruits commercialisables par rapport aux autres variétés en (PF) notamment dans le TBC. Les autres variétés ne présentent pas de différence entre elles. Toutes variétés confondues, le TBC a produit le moins de fruits malgré une différence non significative.

6.5.1.3 Poids de fruits commercialisables

Selon l'analyse de variance (ANOVA), il y a bien un effet significatif des facteurs variété et tunnel sur la production de fruit. Par contre il n'y a pas d'effet d'interaction entre ces facteurs, ni d'effet bloc. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,37 et 0,66. Le test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 %, nous permet de dire que Clery a le poids de fruits commercialisables le plus faible en (PF) dans tous les tunnels et plus encore dans le TBC. Les autres variétés ne présentent pas de différence entre elles. Toutes variétés confondues, le TBC a le poids de fruits le plus bas malgré une différence non significative.

Tableau 10 : Résumé récolte 2 ème Floraison

Récolte 2ème floraison					
Variété par Tunnel	Date de remontée	Rendement commercial (g/plant)	Déchet (%)	Poids moyen commercial (g/plant)	Nombre moyen de fruits commercialisables
Ciflorette TBC	14-mai	315,8	15,9%	303	10
Clery TBC	11-mai	251,1	19,6%	252,9	11,7
Gariguette TBC	14-mai	274,9	22,20%	274,9	7,4
Total TBC		280,6	19,2%	276,9	9,7
Ciflorette TSP	20-mai	308,3	8,3%	308,3	30,4
Clery TSP	20-mai	292,8	11,6%	292,8	27,2
Gariguette TSP	20-mai	333,7	11,1%	333,7	42,8
Total TSP		311,6	10,3%	311,6	33,5
Ciflorette TDP	14-mai	388	13%	388	41
Clery TDP	14-mai	316,3	13,7%	316,3	29
Gariguette TDP	14-mai	365,6	15,0%	365,6	41,6
Total TDP		356,5	13,8%	356,5	37,2

6.5.1.4 Rendement commercial

Selon l'analyse de variance (ANOVA), il y a bien un effet significatif des facteurs variété et tunnel sur la production de fruit. Par contre il n'y a pas d'effet d'interaction entre ces facteurs, ni d'effet bloc. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,88 et 0,54. Le test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 %, nous permet de dire que Clery possède le rendement commercial le plus faible en (PF) notamment dans le TBC. Les autres variétés ne présentent pas de différence entre elles. Toutes variétés confondues, le TBC a le rendement commercial le plus bas malgré une différence non significative au seuil de 5%.

6.5.1.5 Pourcentage de déchet

Selon l'analyse de variance (ANOVA), il y a bien un effet significatif des facteurs variété et tunnel sur la production de fruit. De plus, nous avons un effet d'interaction entre ces facteurs, et un effet bloc qui sont significatifs. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,42 et 0,14. Le test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 %, nous permet de dire que Ciflorette produit le plus de déchet et Clery le moins, malgré des taux de déchet plus importants dans le TBC. Toutes variétés confondues, le TBC génère le plus de déchet de façon significative.

6.5.2 Seconde floraison (Remontée ou SF)

6.5.2.1 Nombre de fruit commercialisable à la remontée

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction entre les facteurs et un effet de bloc qui sont très significatifs. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,98 et 0,66. Le test de post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 % nous permet de dire Clery a le nombre de fruits commercialisable le moins, particulièrement dans le TBC. Le TDP se différencie avec un nombre plus important de fruit.

6.5.2.2 Poids des fruits commercialisables à la remontée

Les prérequis de l'ANOVA (normalité et homoscédasticité) n'étaient pas respectés au départ, nous avons donc réalisé une transformation de données. Les données ont été transformées selon la méthode du BoxCox . Avec cette méthode les prérequis sont respectés avec des p-values respectives de 0,96 et 0,33. Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction entre les facteurs et un effet de bloc qui sont peu significatifs. Le test de post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 %, nous permet de dire que Clery et Gariguettes ont les poids de fruits les plus importants, notamment en TDP et plus faible en TBC. Clery ne se différencie pas des deux autres variétés. Toutes variétés confondues, le TBC a le poids commercial le plus faible.

6.5.2.3 Rendement commercial à la remontée

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction significatif entre les facteurs par contre pas d'effet de bloc. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,13 et 0,78. Le test de post-hoc de Newman-Keuls, nous permet de dire, que Ciflorette a le rendement le plus important et plus élevé dans le TDP. A contrario, Clery a le rendement le plus faible et notamment dans le TBC. Toutes variétés confondues le TDP a le rendement commercial le plus important et le TBC le plus faible et cela au seuil de 5 %.

Tableau 11 : Résumé de récolte Fin de culture

Fin de culture					
Variété par Tunnel	Date de fin culture	Rendement commercial (g/plant)	Déchet (%)	Poids moyen commercial (g/plant)	Nombre moyen de fruits commercialisables
Ciflorette TBC	02-juil	675,9	19,7%	660,8	66
Clery TBC	02-juil	581,3	15,9%	581,3	49,7
Gariguette TBC	02-juil	638,6	19,7%	638,6	65,4
Total TBC		632	18,4%	626,9	60,4
Ciflorette TSP	02-juil	904	12,0%	904	73,2
Clery TSP	02-juil	842,4	9,1%	842,4	61,8
Gariguette TSP	02-juil	950,2	8,5%	950,2	80,3
Total TSP		898,8	9,9%	898,8	71,8
Ciflorette TDP	02-juil	912	12%	911,9	78,8
Clery TDP	02-juil	777,6	9,3%	777,6	59,2
Gariguette TDP	02-juil	880,6	10,5%	880,6	76,5
Total TDP		856,7	10,6%	856,7	71,5

6.5.2.4 *Pourcentage de déchet remontée*

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction entre les facteurs et un effet de bloc qui sont très significatifs. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,29 et 0,45. Le test de post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5 % nous permet de dire que Gariguette a le taux de déchet le plus important et particulièrement en TBC. Ciflorette en a le moins. Toutes variétés confondues, le TBC génère le plus de déchet.

6.5.3 Fin de culture

6.5.3.1 *Nombre de fruit commercialisable fin de culture*

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction entre les facteurs et un effet de bloc qui sont significatifs. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,58 et 0,92. Le test de post-hoc de Newman-Keuls nous permet de dire que Clery sur l'ensemble de la saison a produit un nombre plus faible en fruits commercialisables, d'autant plus sous le TBC. Toutes variétés confondues, le TBC a produit le moins la saison. Les tunnels TDP et TSP ne présentent pas de différence au seuil de 5%.

6.5.3.2 *Poids des fruits par commercialisable fin de culture*

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction significatif entre les facteurs par contre pas d'effet de bloc. Les postulats de normalité et d'homoscédasticité sont vérifiés avec des p-values respectives de 0,25 et 0,85. Selon le test de post-hoc de Newman-Keuls, il n'y aurait aucune différence au niveau du poids entre les variétés pour chaque tunnel. Toutes variétés confondues le TBC a le poids de fruits commercialisable le plus faibles, les autres tunnels ne se différenciant pas au seuil de 5%.

6.5.3.3 *Rendement total à la fin de culture*

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. Par contre nous n'avons pas d'effet d'interaction entre les facteurs et ni d'effet de bloc. Avec le test post-hoc de Newman-Keuls au seuil de 5%, on détermine que Clery a le rendement commercial le plus faible sur toute la saison notamment sous le TBC. Les autres variétés ne présentent pas différence entre elles au niveau du rendement. Toutes variétés confondues, le TBC présente le bas rendement soit 26 % - 30 % de rendement en moins respectivement par rapport au TDP et TSP ce qui est significatif au seuil de 5%.

6.5.3.4 *Pourcentage de déchet fin de la culture*

Selon l'analyse de variance (ANOVA), on constate bien un effet variétal et tunnel significatif. De plus nous avons un effet d'interaction entre les facteurs et un effet de bloc qui sont significatifs. Selon le test de post-hoc de Newman-Keuls, nous permet de déterminer dans le facteur variété, que Ciflorette a produit le taux de déchet le plus important et notamment dans le TBC. A contrario, Clery a produit le moins. Toutes variétés confondues le TBC présente le pourcentage de déchet le plus élevé soit 46 % de déchet en plus de que le TSP et 42 % par rapport au TDP.

7 Discussion

7.1 Discussion climat Première floraison

Pour l'étude du climat, la première floraison (PF) (Février-Juin), peut être scindée en deux périodes, la première période est de (Février-Mars) et la seconde (Avril-mi-Mai).

Entre (Février-Mars), les températures moyennes de jour sont assez douces (19-21°C) pour les différents tunnels, avec 1-2°C de plus pour le TBC par rapport aux autres. En moyenne le TBC présente 7-8°C de plus que l'extérieur. La même remarque peut être faite pour les températures de nuit, nous avons des températures assez douces dans le TBC entre 15-17°C et un peu plus fraîches dans les autres tunnels (10-12°C), soit un écart assez important de 5°C avec le TBC.

Entre (Avril-mi-Mai), les températures de jour augmentent en moyenne de 4-6°C de plus par rapport à (Février-Mars). Les températures de nuit augmentent en moyenne de 3-4°C.

Les températures de jour sont comprises entre (22-25°C) pour les différents tunnels, les températures étant sensiblement les mêmes, avec néanmoins 1-2°C de plus dans le TBC.

Les températures de nuit commencent à être plus élevées (15-22°C) en moyenne pour les différents tunnels avec toujours des températures plus importantes pour le TBC. L'écart de températures qui tend à diminuer avec l'augmentation des températures.

Pour cette (PF), les températures ont été le plus élevées en seconde partie (Avril-mi-Mai), pour les trois tunnels avec de nombreuses températures dépassant les 26°C, la journée comme la nuit (Tableaux 3 et 4). Les températures conseillées au printemps la nuit sont de 12-15°C. Les températures ont une influence sur la quantité d'eau que l'air peut absorber et le déficit hydrique (DH) est l'un des moyens de le savoir.

Le DH moyen de jour sur (Février-Mars) est compris entre 5,6 et 7, les DH des différents tunnels sont sensiblement les mêmes. Entre (Avril et mi-Mai) le DH de journée est autour de 10 pour tous les tunnels, en soirée il est entre (1 et 4,7), plus important en Avril quand mi-Mai, et contrairement à (Février-Mars) le TBC possède le DH le plus élevé.

Pour les tunnels TBC et TSP, des périodes à risque de condensation ont été déterminées, le TSP possède le nombre d'heure à risque le plus important pour cette première floraison. Cela peut s'expliquer par des températures et des DH de nuit plus faibles dans le TSP. Ces périodes à risques se concentrent autour des plages horaires (00H0-8H et 21H-00H0). En (PF), le nombre d'heure à risque est plus élevé dans le TSP, car des données n'ont pas été enregistrées par certaines sondes pour plusieurs journées. Néanmoins, on observe un différentiel de température jour-nuit plus important dans le TSP qui peut atteindre 11°C d'écart. Malgré des périodes à risque de condensation plus importantes dans le TSP, une présence plus importante en oïdium a été observé dans le TBC.

La quantité d'énergie stockée dans les bidons du TBC augmente progressive de 2 kWh/m² entre Janvier et Mars, en Avril on observe une légère baisse de la quantité stockée, un plateau de stockage a été atteint. L'énergie stockée et libérée par les hydro-accumulateurs, permet de créer un climat plus stable qui favorise le développement et à la croissance du fraisier.

Les températures qui règnent dans le TBC ont permis d'avoir une entrée en floraison et une production précoce de deux-trois semaines sur les aux autres et en fonction des variétés.

En (PF), pour le nombre de fruits et le poids de fruits commercialisables par plant, le TBC se place en dernière position avec 9-11% de fruits commercialisables en moins et 150-230g en moins respectivement par rapport au TDP et au TSP. La variété Clery se distingue des autres

variétés dans les deux cas, avec une productivité et un poids de fruits plus bas dans les trois tunnels.

Le TBC présente quasiment deux fois plus de déchets que les autres tunnels, et la variété Clery présente le moins de déchets de façon générale sur les trois tunnels. Ce pourcentage élevé de déchet dans le TBC se retranscrit dans le rendement commercial, effectivement le TBC présente 150-250 g/plant en moins respectivement sur le TDP et le TSP.

De façon générale en première floraison, les températures ainsi que le DH ne sont pas très élevés. Par contre, ils deviennent plus importants lorsqu'on se rapproche de la période estivale.

7.2 Discussion climat Seconde floraison

Pour la seconde floraison (SF), les températures des tunnels et extérieure sont nettement supérieures à celles de la première floraison. Dans les tunnels, nous avons des températures moyennes de jour comprises entre (24-27,5°C), avec une moyenne de proche de 25°C en seconde partie de Mai et de 26,7°C en Juin pour les trois tunnels. Les températures de jour sont sensiblement les mêmes pour tous les tunnels avec tout de même, une température légèrement supérieure dans le TBC. En moyenne, nous avons 4°C de plus dans le TBC par rapport à l'extérieur.

Les températures de nuit sont élevées, comprises entre (18,5-22°C), plus importantes dans le TBC de 3°C en moyenne en Mai, de 2°C en Juin par rapport aux autres tunnels et de 4°C par rapport à l'extérieur. Le risque de surchauffe est 5 à 6 fois plus important en (SF) qu'en (PF), mais contrairement à la (PF), le TBC est plus souvent en risque de surchauffe que les autres tunnels.

Les DH sont aussi nettement supérieur en (SF) qu' en (PF). Dans les tunnels nous avons un DH moyen de jour d'environ 10 en Mai et proche de 12 en Juin. Le TBC présente toujours un DH légèrement supérieur à celui des autres tunnels. La nuit, le DH est compris entre (1-5), le TBC présente toujours des valeurs plus importantes que les autres tunnels. Tout comme en (PF) le nombre d'heure à risque de condensation est plus important dans le TSP, il y a plus de risque en (PF) qu'en seconde, du moins pour le TSP.

En fin de (PF), on observait le début d'un plateau de charge d'énergie par les hydro-accumulateur qui était dû à l'augmentation de la durée de journée, de l'énergie apportée par les rayonnements ainsi que de la capacité de stockage limitée du au volume des bidons. En (SF), nous avons confirmation d'un plateau saturant, malgré une augmentation en Mai, la quantité d'énergie stockée en (SP) est certainement supérieure à celle de la (PF), mais la charge et la saturation se font et sont atteintes plus rapidement.

L'énergie libérée par les hydro-accumulateurs dans le TBC, crée un climat non favorable pour le développement du fraisier. Des températures élevées au-delà de 26°C réduise la floribondité et la qualité des fruits du fraisier. Le nombre de fruits commercialisables pour le TBC est pratiquement quatre fois inférieur à celui des autres tunnels et 3 fois inférieur à celui de la (PF). Comme en (PF) la variété Clery présente le nombre de fruit le moins important.

Le poids moyen des fruits commercialisables à lui aussi diminué, le TBC présente toujours un poids moyen inférieur à celui des autres, mais comparativement à la (PF), la perte de poids est la moins marquée. La variété Ciflorette présente le poids moyen le plus élevé. Paradoxalement, Ciflorette est l'une des variétés qui a subi la perte de poids la plus importante entre la (PF) et la (SF).

La réduction du calibre de fruit par la perte de poids a entraîné un pourcentage de déchet plus important en (SF) pour tous les tunnels. Tout comme en (PF), le TBC se distingue des autres, avec le taux de déchet le plus élevé près de 20%. Mais comparativement à la (PF), le TBC présente la plus faible hausse moins de 2%, et le TDP la forte, près de 7%.

Entre la (PF) et la (SF) Ciflorette est passée du taux de déchet le plus important au taux le plus bas.

Par extension à l'augmentation du taux de déchet, nous avons une réduction du rendement commercialisable pour tous les tunnels. Comme pour le taux de déchet, le TBC présente le rendement commercial le moins important, mais une augmentation de perte de rendement beaucoup moins élevée que les autres tunnels.

De façon générale pour la (SF), les températures et le DH sont très élevés, ainsi que les écarts jour-nuit. Le risque de surchauffe est plus important dans le TBC. Le risque de condensation est moins élevé qu'en (PF), néanmoins plus présent dans le TSP. Le nombre de fruits, le poids ainsi que le rendement commercialisable sont beaucoup moins importants notamment pour Ciflorette et Clery dans le TBC. Toutes variétés confondues et dans tous les cas d'étude, le TBC présente les valeurs les plus basses sauf pour le taux de déchet qui reste important.

Les fraisiers sont principalement cultivés sous des climats tempérés à cause d'un optimum de température de croissance compris entre 10-26°C (Ledesma, Nakata, et Sugiyama 2008). L'augmentation de la température participe à l'accélération de la maturation de la fraise, dans le TBC, les températures jour-nuit étaient plus importantes que dans les autres tunnels, ce qui explique l'entrée en production précoce observée. L'interaction température/photopériode est importante pour le développement de la plante, notamment lors de l'initiation florale. Pour les variétés remontantes comme celles étudiées, lorsque la photopériode est faible (10-12H) comme en début de saison, les températures jour-nuit recherchées sont respectivement 18/14°C (Bosc et Bardet, 2014).

Dans le TBC, les températures étaient légèrement supérieures à celles recherchées, augmentant la capacité de l'air à absorber la vapeur d'eau et permettant ainsi de lutter contre l'humidité et par extension contre le développement de maladies fongiques. Malgré cela, on observe tout de même, des périodes à risque de condensation importants, synonyme d'un déficit hydrique encore trop faible.

En fin de culture, le nombre de fruits, le poids ainsi que le rendement commercial total sont beaucoup moins importants pour Clery, particulièrement dans le TBC. Le taux de déchet final est toujours plus important dans le TBC surtout pour les Ciflorette et Gariguette, près de 20%. Cela peut s'expliquer par des températures de jour et des DH bien plus élevés dans le TBC. Des DH forts, synonymes de faible humidité participent à la réduction de la production de fruits par une mauvaise nouaison et par la production de fruits malformés (Lieten, 2002).

Les températures sont plus élevées en fin de production (Mai-Juin), ce qui est normal puisque nous nous rapprochons de la saison estivale. Dans le même temps on constate que le nombre d'heures où les températures optimales de croissance et de production du fraisier (7°C-25°C), diminue fortement et en particulier pour le TBC. De plus, il n'y a plus de température horaire inférieure ou égale à 7°C et cela dans tous les tunnels.

Le nombre d'heures à surchauffe est plus important dans le TBC que dans les autres tunnels, on enregistre de nombreuses températures dépassant les 35°C. Ces températures sont dues à une décharge d'énergie plus importante en (SF), il devient donc primordial de trouver des solutions pour atténuer ce climat défavorable.

Le faible rendement et le taux de déchet majeur du TBC résultent de températures légèrement trop élevées dues à l'apport d'énergie des hydro-accumulateurs et d'un DH moyen.

8 Conclusion

L'essai du TBC avait pour intérêt d'observer et de comparer les résultats agronomiques du TBC par rapport aux tunnels de références, mais aussi de voir si le TBC pouvait être compétitif en terme de coût énergétique par rapport à des cultures de fraises sous serres conventionnelles chauffées.

Le TBC par ses températures élevées, se révèle être un outil intéressant pour une production précoce, mais cet avantage peut devenir rapidement un inconvénient lorsque les températures deviennent trop importantes. Un Hiver et un Printemps doux, en plus d'un Été très chaud, créent des conditions climatiques défavorables pour une production accrue de fraises dans le TBC. Le rendement commercial étant la partie la plus importante de la production, il a été considérablement réduit dans le TBC et notamment pour la variété Clery. En raison des températures et des DH élevés, les plantes produisent des fruits plus petits, de forme irrégulière. La forme, le calibre et la couleur des fraises sont des caractères de qualité importants qui attirent l'attention du consommateur. Qualités qui ont diminuées en (SF) pour le TBC et pour Cléry.

Avec des résultats agronomiques inférieurs aux tunnels de référence, il est tout de même possible d'optimiser la production du TBC. Pour cela, il sera impératif d'abaisser les températures, soit en modifiant les consignes d'aération, pour augmenter les échanges d'air entre le tunnel et l'extérieur. La mise en place de bâches plastiques blanches pour limiter l'accumulation de l'énergie dans les bidons (réduction des échanges par rayonnement et convection) et donc éviter des températures trop élevées dans le TBC est également une piste d'amélioration pour la prochaine campagne.

Dans cette étude, la relation entre la température et le rendement ont bien été mis en évidence. L'augmentation des températures conduit à une production précoce tout en réduisant le rendement final. Le dispositif bioclimatique en plus d'être un outil intéressant pour la précocité, il peut être utilisé comme alternative au chauffage conventionnel pour des surfaces de petites tailles (<5000m²) et pour des plants de petites tailles.

Le TBC a permis de stocker 72 kWh/m² d'énergie sur la saison, ce qui représente la même consommation d'énergie pour une culture conventionnelle chauffée de fraise dans une serre F-Clean en double paroi dans les conditions du Sud de la France. Pour un coût du kWh du gaz naturel à 0,042€ HTVA (avec taxes et abonnement), on réalise une économie de 3€ /m². Ce système bioclimatique présente donc bien un intérêt agroécologique fort, puisqu'il peut être utilisé à la place du chauffage conventionnel dans des exploitations agricoles.

Bibliographie :

- Antoniadis, Christodoulos. s. d. « Investigation of the Performance of Solar Thermal Systems with Seasonal Storage for Domestic Applications », 74.
- Balasooriya, B.L.H.N., K. Dassanayake, et S. Ajlouni. 2020. « High Temperature Effects on Strawberry Fruit Quality and Antioxidant Contents ». *Acta Horticulturae*, n° 1278 (avril): 225-34. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1278.33>.
- Benli, Hüseyin, et Aydın Durmuş. 2009. « Performance Analysis of a Latent Heat Storage System with Phase Change Material for New Designed Solar Collectors in Greenhouse Heating ». *Solar Energy* 83 (12): 2109-19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.07.005>.
- Bergeron, Daniel. s. d. « Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec », 58.
- Beshada, E, Q Zhang, et R Boris. 2006. « Winter Performance of a Solar Energy Greenhouse in Southern Manitoba ». *CANADIAN BIOSYSTEMS ENGINEERING* 48: 8.
- Cao, Kai, Hongjun Xu, Rong Zhang, Dawei Xu, Lulu Yan, Yachen Sun, Liru Xia, Jiantao Zhao, Zhirong Zou, et Encai Bao. 2019. « Renewable and Sustainable Strategies for Improving the Thermal Environment of Chinese Solar Greenhouses ». *Energy and Buildings* 202 (novembre): 109414. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109414>.
- Deiana, Alessandro, et Enrico Fabrizio. s. d. « Energy Performance Optimization of Typical Chinese Solar Greenhouses by Means of Dynamic Simulation », 9.
- Grant, Olga M., Abigail W. Johnson, Michael J. Davies, Celia M. James, et David W. Simpson. 2010. « Physiological and Morphological Diversity of Cultivated Strawberry (*Fragaria×ananassa*) in Response to Water Deficit ». *Environmental and Experimental Botany* 68 (3): 264-72. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.01.008>.
- Grijalba, Carlos Mario, María Mercedes Pérez-Trujillo, Diana Ruiz, et Ana María Ferrucho. 2015. « Strawberry Yields with High-Tunnel and Open-Field Cultivations and the Relationship with Vegetative and Reproductive Plant Characteristics ». *Agronomía Colombiana* 33 (2): 147-54. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n2.52000>.
- Grisey, Ariane, et Eric Brajeul. 2009. « La maîtrise de l'énergie en culture sous serre », 18.
- Grisey, Ariane, et Fabien Pommier. s. d. « Utilisation Rationnelle de l'Energie dans les serres: Situation technico – économique en 2005 et leviers d'action actuels et futurs », 270. « Growth stages of mono and dicotyledonous plants.pdf ». s. d.
- Hosseini-Fashami, Fatemeh, Ali Motevali, Ashkan Nabavi-Pelesaraei, Seyyed Jafar Hashemi, et Kwok-wing Chau. 2019. « Energy-Life Cycle Assessment on Applying Solar Technologies for Greenhouse Strawberry Production ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116 (décembre): 109411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109411>.

- Kadir, Sorkel, Gaganpreet Sidhu, et Kassim Al-Khatib. 2006. « Strawberry (*Fragaria ×ananassa* Duch.) Growth and Productivity as Affected by Temperature ». *HortScience* 41 (6): 1423-30. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.6.1423>.
- Kennedy, Colleen, Tomas N. Hasing, Natalia A. Peres, et Vance M. Whitaker. 2013. « Evaluation of Strawberry Species and Cultivars for Powdery Mildew Resistance in Open-Field and High Tunnel Production Systems ». *HortScience* 48 (9): 1125-29. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.9.1125>.
- Klamkowski, Krzysztof, et Waldemar Treder. s. d. « RESPONSE TO DROUGHT STRESS OF THREE STRAWBERRY CULTIVARS GROWN UNDER GREENHOUSE CONDITIONS » 16: 11.
- Knewton, Sharon J.B., Edward E. Carey, et M.B. Kirkham. 2010. « Management Practices of Growers Using High Tunnels in the Central Great Plains of the United States ». *HortTechnology* 20 (3): 639-45. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.20.3.639>.
- Ledesma, N.A., M. Nakata, et N. Sugiyama. 2008. « Effect of High Temperature Stress on the Reproductive Growth of Strawberry Cvs. ‘Nyoho’ and ‘Toyonoka’ ». *Scientia Horticulturae* 116 (2): 186-93. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.12.010>.
- Lieten, P. 2002. « THE EFFECT OF HUMIDITY ON THE PERFORMANCE OF GREENHOUSE GROWN STRAWBERRY ». *Acta Horticulturae*, n° 567 (janvier): 479-82. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.101>.
- Ling, Haoshu, Chao Chen, Yong Guan, Shen Wei, Ziguang Chen, et Na Li. 2014. « Active Heat Storage Characteristics of Active–Passive Triple Wall with Phase Change Material ». *Solar Energy* 110 (décembre): 276-85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.015>.
- « L’oïdium DU FraISIER UN oUTIL dE préVIoN dU rIsQUE.pdf ». s. d.
- Montone, Verona O., Clyde W. Fraisse, Natalia A. Peres, Paulo C. Sentelhas, Mark Gleason, Michael Ellis, et Guido Schnabel. 2016. « Evaluation of Leaf Wetness Duration Models for Operational Use in Strawberry Disease-Warning Systems in Four US States ». *International Journal of Biometeorology* 60 (11): 1761-74. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1165-4>.
- Palencia, Pedro, Fátima Martínez, Juan Jesús Medina, et José López-Medina. 2013. « Strawberry Yield Efficiency and Its Correlation with Temperature and Solar Radiation ». *Horticultura Brasileira* 31 (1): 93-99. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000100015>.
- « PARC SERRE ET ÉNERGIE.pdf ». s. d.
- Prenger, Jessica J, et Peter P Ling. s. d. « Greenhouse Condensation Control », 4.
- Santamouris, M., C.A. Balaras, E. Dascalaki, et M. Vallindras. 1994. « Passive Solar Agricultural Greenhouses: A Worldwide Classification and Evaluation of Technologies and Systems Used for Heating Purposes ». *Solar Energy* 53 (5): 411-26. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90056-6).

« Structure, Function, Application, and Ecological Benefit of a Single-slope, Energy-efficient Solar Greenhouse in China.pdf ». s. d.

Verheul, Michèl J., Anita Sønsteby, et Svein O. Grimstad. 2007. « Influences of Day and Night Temperatures on Flowering of *Fragaria x Ananassa* Duch., Cvs. Korona and Elsanta, at Different Photoperiods ». *Scientia Horticulturae* 112 (2): 200-206.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.022>.

Wang, Shioh Y, et Mary J Camp. 2000. « Temperatures after Bloom Affect Plant Growth and Fruit Quality of Strawberry ». *Scientia Horticulturae* 85 (3): 183-99.
[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00143-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00143-0).

Xiao, C. L., C. K. Chandler, J. F. Price, J. R. Duval, J. C. Mertely, et D. E. Legard. 2001. « Comparison of Epidemics of Botrytis Fruit Rot and Powdery Mildew of Strawberry in Large Plastic Tunnel and Field Production Systems ». *Plant Disease* 85 (8): 901-9.
<https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.8.901>.

Xu, Xiangming, David C. Harris, et Angela M. Berrie. 2000. « Modeling Infection of Strawberry Flowers by *Botrytis Cinerea* Using Field Data ». *Phytopathology* 90 (12): 1367-74. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.12.1367>.

Zhang, Xin, Hongli Wang, Zhirong Zou, et Shaojin Wang. 2016. « CFD and Weighted Entropy Based Simulation and Optimisation of Chinese Solar Greenhouse Temperature Distribution ». *Biosystems Engineering* 142 (février): 12-26.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.006>.

Comparaison des températures tunnels et extérieurs	Comparaison des DH tunnels
<p>Février</p> <p>TMJTBC et TMJTSP : W = 41725, p-value = 0.002104</p> <p>TMTJBC et TMJTDP : W = 44589, p-value = 3.109e-06</p> <p>TMTJBC et Extérieur Journée : W = 67437, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMJTBC et TMSTBC : W = 88020, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTSP : W = 121780, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTDP : W = 118598, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et Extérieur soirée : W = 67437, p-value < 2.2e-16</p> <p>Mars</p> <p>TMJTBC et TMJTSP : W = 74269, p-value = 0.03854</p> <p>TMJTBC et TMJTDP : W = 81849, p-value = 1.99e-07</p> <p>TMJTBC et TMJE : W = 126299, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMJTBC et TMSTBC : W = 115901, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTSP : W = 134038, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTDP : W = 127636, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSE : W = 126299, p-value < 2.2e-16</p> <p>Avril</p> <p>TMJTBC et TMJTSP : W = 48057, p-value = 0.2541</p> <p>TMJTBC et TMJTDP : W = 48693, p-value = 0.3009</p> <p>TMJTBC et TMJE : W = 46712, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTSP : W = 61116, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTDP : W = 60262, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMJTBC et TMSTBC : W = 32945, p-value = 8.135e-10</p> <p>TMJTBC et TMSTBC : W = 62562, p-value = 2.239e-0</p> <p>Mai</p> <p>TMJTBC et TMJTSP : W = 35897, p-value = 0,2174</p> <p>TMJTBC et TMJTDP : W = 37212, p-value = 0,3689</p> <p>TMJTBC et TMJE : W=106812, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTSP : W = 92185, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSTDP : W = 92841, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMSTBC et TMSE : W=56812, p-value < 2.2e-16</p> <p>TMJTBC et TMSTBC : W = 52571, p-value = 2.239e-07</p> <p>Juin</p> <p>TJMT17 et TJMT18 : W = 60538, p-value = 0.03824</p> <p>TJMT17 et TJMT19 : W = 66402, p-value = 0.0004487</p> <p>TJMT17 et TJMEX : W = 92922, p-value < 2.2e-16</p> <p>TJST17 et TJST18 : W = 39148, p-value < 2.2e-16</p> <p>TJST17 et TJST19 : W = 41298, p-value < 2.2e-16</p> <p>TJST17 et TJSEX : W = 48598, p-value < 2.2e-16</p> <p>TJST17 et TJMT17 : W = 7594, p-value < 2.2e-16</p>	<p>Février</p> <p>DHJTBC et DHJTSP : W = 31340, p-value = 0.9216</p> <p>DHJTBC et DHJTDP : W = 34181, p-value = 0.09911</p> <p>DHSTBC et DHSTSP : W = 47189, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHSTBC et DHSTDP : W = 55477, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHTBCJ et DHSTBC : W = 47064, p-value < 2.2e-16</p> <p>Mars</p> <p>DHJTBC et DHJTSP : W = 32345, p-value = 0.6035</p> <p>DHJTBC et DHJTDP : W = 34658, p-value = 0.05209</p> <p>DHTBCS et DHSTSP : W = 49695, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHSTBC et DHSTDP : W = 55288, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHTBCJ et DHTBCS : W = 51426, p-value < 2.2e-16</p> <p>Avril</p> <p>DHTBCJ et DHTSPJ : W = 80904, p-value = 0.5946</p> <p>DHTBCJ et DHTDP : W = 78557, p-value = 0.2994</p> <p>DHTBCS et DHTSPS : W = 45370, p-value = 0.3202</p> <p>DHTBCS et DHTDPS : W = 77366, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHTBCJ et DHTBCS : W = 105861, p-value < 2.2e-16</p> <p>Mai</p> <p>DHTBCJ et DHTSPJ : W = 105931, p-value = 0.7934</p> <p>DHTBCJ et DHTDPJ : W = 109312, p-value = 0.2686</p> <p>DHTBCS et DHTSPS : W = 54537, p-value = 7.287e-13</p> <p>DHTBCS et DHTDPS : W = 56843, p-value < 2.2e-16</p> <p>DHTBCJ et DHTBCS : W = 105861, p-value < 2.2e-16</p> <p>Juin</p> <p>DHJMT17 et DHJMT18 : W = 62310, p-value = 0.3511</p> <p>DHJMT17 et DHJMT19 : W = 62111, p-value = 0.3916</p> <p>DHJST17 et DHJST18 : W = 34413, p-value = 7.287e09</p> <p>DHJST17 et DHJST19 : W = 33688, p-value = 2.286e07</p> <p>DHJST17 et DHJMT17 : W = 10457, p-value < 2.2e-16</p>

Annexe II : Effet bloc étude de rendement Le bloc A correspond aux parcelles (411, 412, 421 et 422), le bloc B aux parcelles (431, 432, 441 et 442), le bloc C aux parcelles (451, 452, 461 et 462) le bloc D aux parcelles (511, 512, 521 et 522) le bloc E aux parcelles (531, 532, 541 et 542) le bloc F aux parcelles (551, 552, 561 et 562) le bloc G aux parcelles (611, 612, 621 et 622) le bloc H aux parcelles (631, 632, 641 et 642) enfin le bloc I correspond aux parcelles (651, 652, 661 et 662)

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	g
	B	fg
	C	de
TSP	D	bc
	E	b
	F	a
TDP	G	ef
	H	d
	I	cd

Précocité

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	b
	B	c
	C	a
TSP	D	d
	E	d
	F	bc
TDP	G	d
	H	d
	I	cd

Pourcentage de déchet (PF)

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	ab
	B	c
	C	ab
TSP	D	ab
	E	c
	F	bc
TDP	G	ab
	H	c
	I	ab

Nombre de fruits remontée

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	bc
	B	c
	C	ab
TSP	D	ab
	E	abc
	F	abc
TDP	G	a
	H	ab
	I	a

Poids de fruits commercialisables remontée

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	c
	B	c
	C	abc
TSP	D	abc
	E	bc
	F	abc
TDP	G	ab
	H	abc
	I	a

Rendement commercialisable remontée

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	a
	B	ab
	C	bc
TSP	D	cd
	E	cd
	F	d
TDP	G	bc
	H	cd
	I	cd

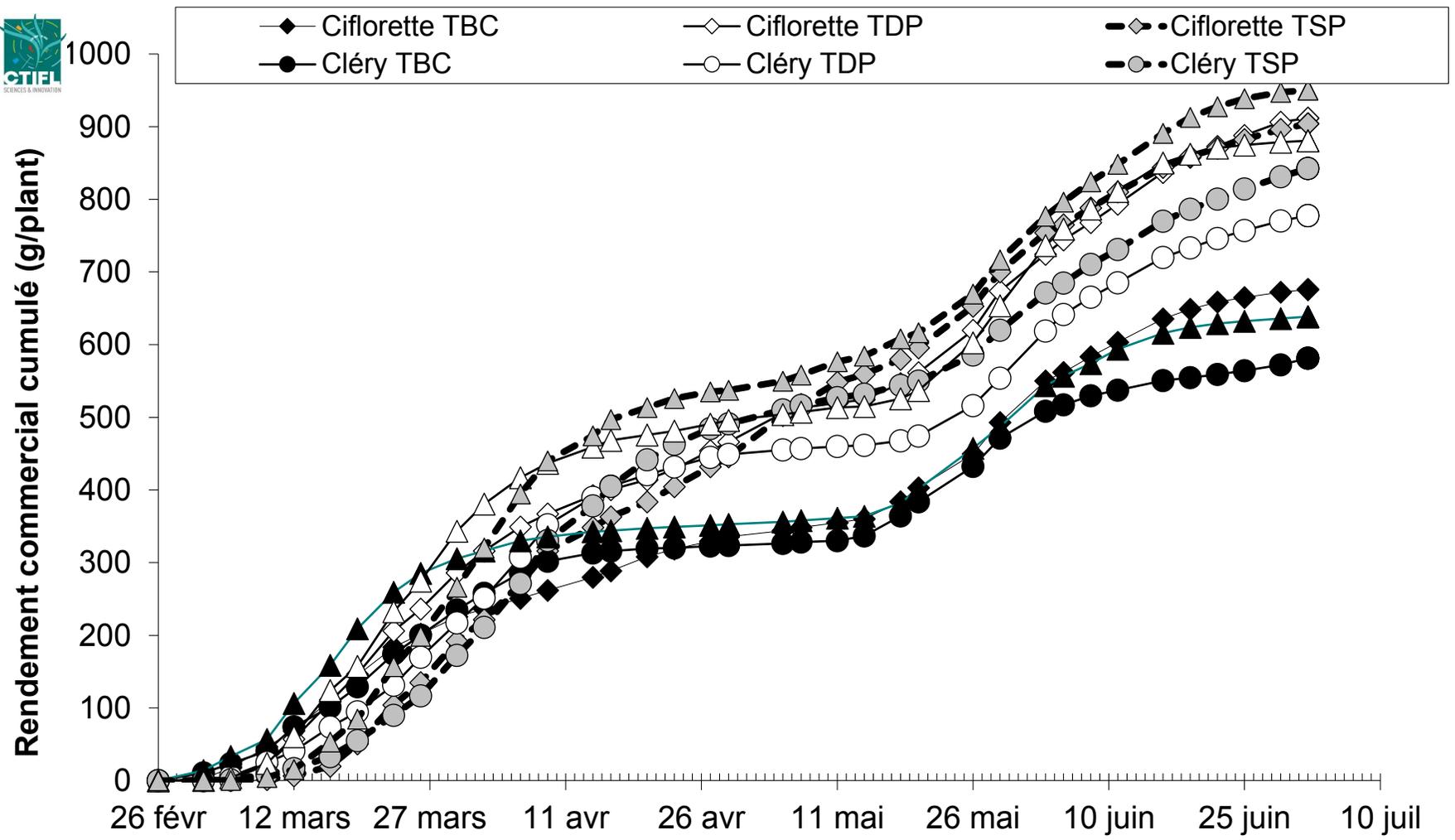
Pourcentage de déchet remontée

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	a
	B	b
	C	a
TSP	D	c
	E	c
	F	c
TDP	G	c
	H	c
	I	c

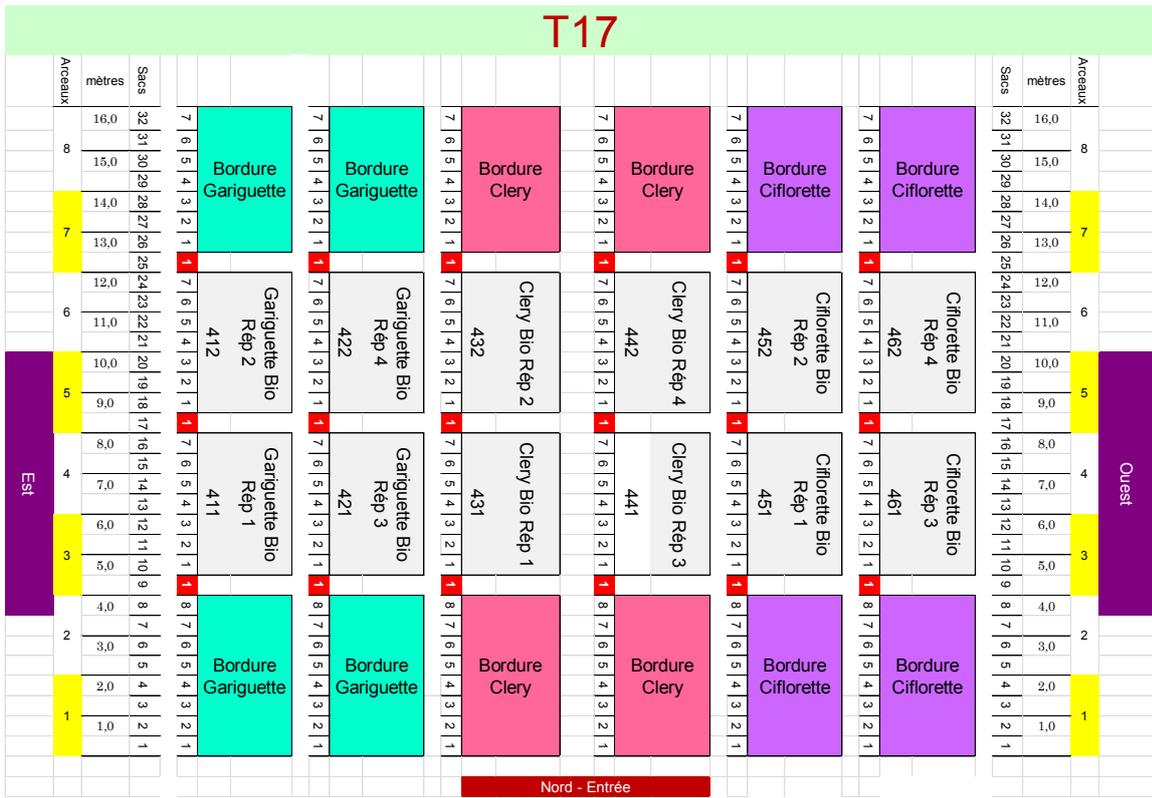
Pourcentage de déchet total

Tunnel	Bloc	Résultat effet bloc
TBC	A	cd
	B	e
	C	bcd
TSP	D	a
	E	d
	F	abc
TDP	G	ab
	H	de
	I	a

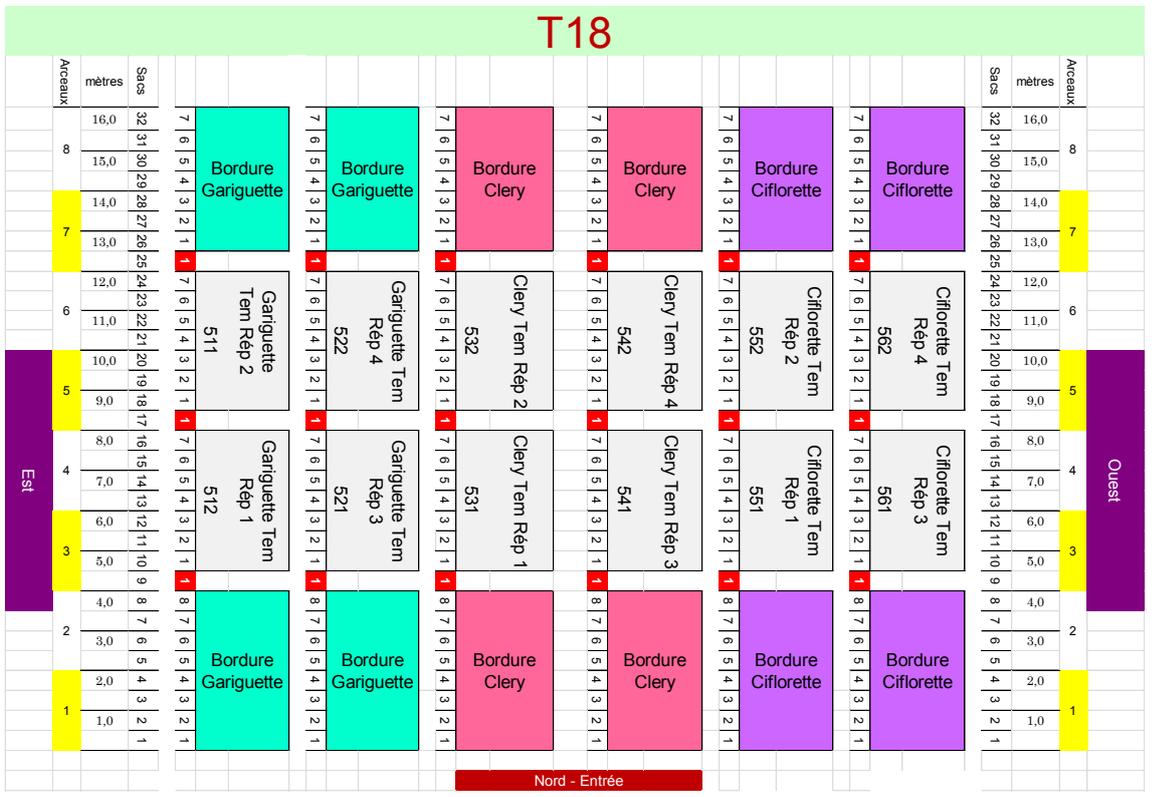
Nombre de fruits commercialisables total



Tunnel bioclimatique (TBC)

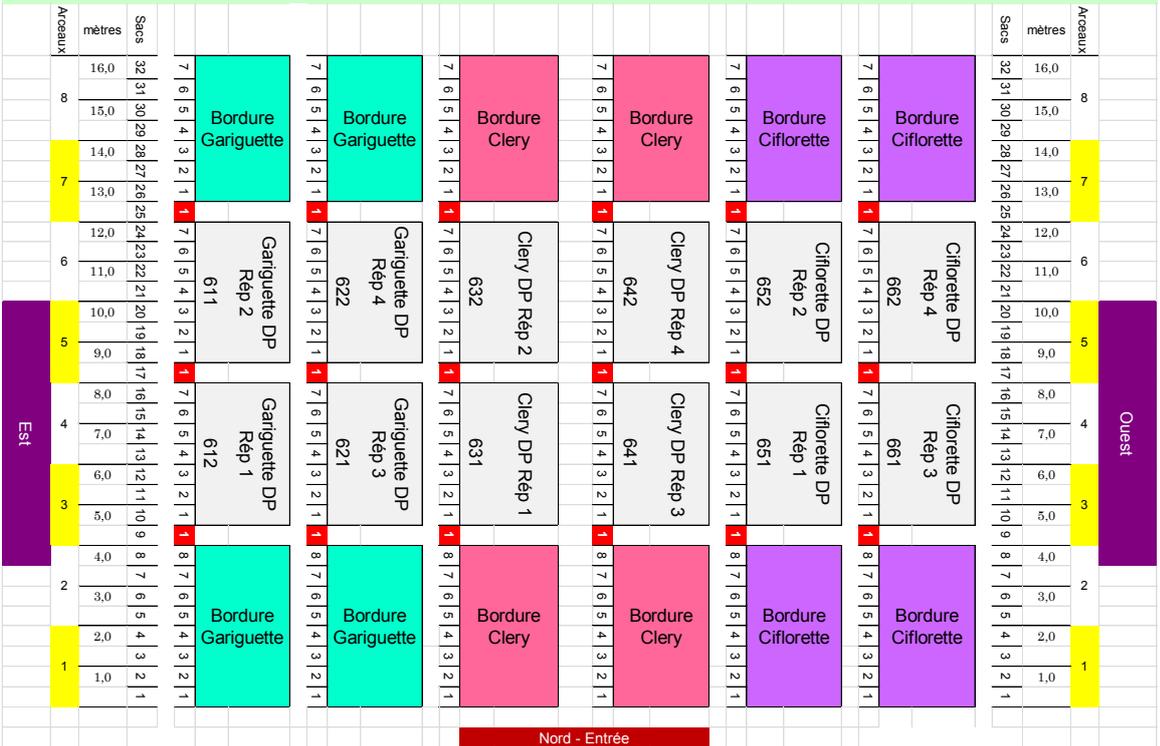


Tunnel simple paroi (TSP)



Tunnel double paroi (TDP)

T19



 agriculture • alimentation • environnement    UNIVERSITÉ DE NANTES	Diplôme: Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Filière de l'Horticulture et Innovation (FHI)
Auteur(s) : NTEPPE-NYEMB Jean-Alcyon Date de naissance* : 14/03/1996	Organisme d'accueil : CTIFL (Balandran) Adresse : 751, Chemin de Balandran, 30127
Nb pages : 43 Annexe(s) : 7	Bellegarde
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Ariane GRISEY
Titre français : Evaluation d'un tunnel bioclimatique en culture de fraise hors-sol Titre anglais : Evaluatio of a bioclimatic tunnel for a soilless stawberry cultivation	
<p>Résumé (1600 caractères maximum) : L'essai vise à comparer le climat et la production de fraise en hors-sol dans un tunnel bioclimatique double paroi (TBC) et dans deux tunnels de référence (tunnel simple paroi (TSP) et tunnel double paroi (TDP) non chauffés. Le TBC est équipé de réservoirs d'eau qui permettent de stocker l'énergie solaire de la journée pour la restituer la nuit. L'objectif de l'essai est de voir si le TBC est plus performant agronomiquement que les tunnels de référence mais aussi plus compétitif énergétiquement par rapport à des serres chauffées. Le dispositif bioclimatique a permis d'avoir une précocité et une rentrée en récolte plus rapide (4 Mars), soit quelques jours avant les autres abris. Sur l'ensemble de la période d'étude, le TBC a présenté des températures de journée comme de soirée plus élevées en moyenne de 4-6°C par rapports aux tunnels de référence. Des périodes de surchauffe (au-delà de 26°C) critiques pour le fraisier ont été plus nombreuses dans le TBC. Le DH important du TBC a permis de limiter les conditions propices de développement (condensation) de pathogènes. Ainsi, les périodes à risque de condensation sont moins importantes dans le TBC que dans le TSP. Les conditions climatiques du TBC ont été pénalisantes sur le rendement final avec de nombreux déchet de fruits. Le TBC présente 25 à 30% de rendement commercial en moins selon les variétés. Les conditions climatiques de l'année avec des températures peu froides et un printemps plutôt clément ont été favorables au TSP.</p>	
<p>Abstract (1600 caractères maximum) : The aim of the experiment is to compare the climate and the production of strawberry in soilless cultivation in a double-walled bioclimatic tunnel (TBC) and in two reference tunnels (single-walled tunnel (TSP) and unheated double-walled tunnel (TDP)). The TBC is equipped with water storage tanks that store solar energy during the day and release it at night. The objective of the test is to see if the TBC is more agronomically efficient than the reference tunnels but also more energy competitive compared to heated greenhouses. The bioclimatic system allowed an early harvest and a quicker return to harvest (March 4), a few days before the other greenhouses. Over the whole study period, the TBC presented day and evening temperatures 4-6°C higher on average compared to the reference tunnels. Critical overheating periods (above 26°C) for the strawberry plant were more numerous in the TBC. The high DH of the TBC helped to limit conditions conducive to pathogen development (condensation). Thus, the periods at risk of condensation are less important in the TBC than in the TSP. The climatic conditions of the TBC were penalizing on the final yield with many fruit wastes. The TBC has 25 to 30% less commercial yield depending on the variety. The climatic conditions of the year with not very cold temperatures and a rather mild spring were favourable for the TSP</p>	
Mots-clés : Serre bioclimatique ;Fraise ;Température ;Humidité ;Surchauffe ;Condensation ;CTIFL Key Words: Bioclimatic Greenhouse ;Strawberry ;Temperature ;Humidity ;Overheating ;Condensation ;CTIFL	