



HAL
open science

Utilisation d'éclairage photosynthétique LED en cultures de tomate hors sol chauffées

Diana Nacouzi

► **To cite this version:**

Diana Nacouzi. Utilisation d'éclairage photosynthétique LED en cultures de tomate hors sol chauffées. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02464353

HAL Id: dumas-02464353

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02464353v1>

Submitted on 3 Feb 2020

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

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



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

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



UNIVERSITÉ DE NANTES

Année universitaire : 2018-2019

Spécialité : Biologie Végétale

Spécialisation (et option éventuelle) :

Filières de l'horticulture et innovation (FHI)

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Utilisation d'éclairage photosynthétique LED en cultures de tomate hors sol chauffées

Par : Diana NACOUZI



Soutenu à Angers le 11 juin 2019

Devant le jury composé de :

Président : Didier PELTIER

Maître de stage : Raphaël TISIOT

Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU

Autres membres du jury

Philippe SIMIER

Jérémy CLOTAULT

Emmanuel GEOFFRIAU

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

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

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>





ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

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

Signature :

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

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

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ :
(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⁾ **Diana NACOUZI**
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 de spécialisation ou son représentant

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

Oui Non

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

Si oui, il autorise

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

Date et signature de l'enseignant :

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

(2) Signature et cachet de l'organisme

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

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

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée dans la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier Madame Sarah MOYSE, directrice du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL) de Balandran pour son accueil.

Je remercie également mon maître de stage M. Raphael TISIOT, ingénieur d'expérimentation au CTIFL pour sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont contribué à l'alimentation de ma réflexion.

Je remercie en particulier M. Laurant ROSSO, technicien de l'équipe tomate qui a partagé avec moi ses connaissances et expériences précieuses.

Je tiens à remercier Madame Ariane GRISEY et les stagiaires de l'équipe tomate Léo LAFFARGUE et Amandine BOGNER pour leur grand soutien pendant mon stage.

Je souhaite remercier M. Etienne CHANTOISEAU, maître de conférences à l'AgroCampus Ouest à Angers pour son suivi et ses conseils tout le long de mon stage, de même pour avoir relu et corrigé mon mémoire. Ses conseils de rédaction ont été très précieux.

Je remercie également tous les ingénieurs, techniciens, ouvriers et stagiaires du site de Balandran et de Saint Rémy, ils ont été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie mes chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements.

Je remercie mes amis libanais et français, leur soutien et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Enfin, je tiens à remercier tous les colocataires de la maison des stagiaires avec qui j'ai passé des moments agréables et inoubliables.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Contenu

I- INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE	1
1. La production de tomate en France	2
2. L'éclairage	2
3. Les photorecepteurs	3
4. Effets de la lumière sur la photosynthèse et le développement des plantes	3
5. Daily Light Integral (DLI)	4
6. Les lampes HPS (High Pressure Sodium)	4
7. Les lampes LED (Light Emitting Diodes)	5
8. Objectifs de l'étude	5
II- MATERIELS ET METHODES	6
1. Condition de culture	6
1.1. Dispositif expérimental	6
2. Développement des plantes	7
2.1. Elongation des plantes	7
2.2. Diamètre de tige	7
2.3. Stade de floraison	7
2.4. Stade de récolte	7
2.5. Charge en fruits sur les plantes.....	7
2.6. Leaf Area Index (LAI)	7
2.7. Vapour Pressure Deficit	7
3. Qualités physico-chimiques des fruits	8
3.1. Taux de fermeté des fruits	8
3.2. Taux de fermeté après conservation	8
3.3. Texture des fruits.....	8
3.4. Mesures colorimétriques	8
3.5. Taux de matière sèche dans les fruits	8
3.6. Taux de sucre dans les fruits	8
4. Production	9
5. Bilan économique	9
6. Analyse sensorielle	9
7. Traitement statistique	9
III- RESULTATS	10
1. Développement des plantes	10
1.1. Longueur des plantes.....	10

1.2.	Elongation	10
1.3.	Diamètre de tige	10
1.4.	Stades de floraison et de récolte	11
1.5.	Leaf Area Index (LAI)	11
1.6.	Vapour Pressure Deficit	11
2.	Qualités physico-chimiques des fruits	12
2.1.	Taux de fermeté des fruits	12
2.2.	Texture des fruits	12
2.3.	Taux de matière sèche dans les fruits	13
2.4.	Taux de sucre dans les fruits	13
3.	Production	13
3.1.	Charge en fruits sur les plantes	13
3.2.	Rendement commercialisable total	13
3.3.	Poids moyen des fruits commercialisables	14
3.4.	Fruits verts non commercialisables	14
4.	Bilan économique	14
4.1.	Consommation électrique	14
4.2.	Efficience énergétique	15
4.3.	Bilan	15
5.	Analyse sensorielle	15
6.	ACP générale	15
IV-	DISCUSSION	17
1.	Développement des plantes	17
2.	Qualités physico-chimiques des fruits	18
3.	Production	19
4.	Bilan économique	20
5.	Analyse sensorielle	20
IV-	CONCLUSION	22
V-	PERSPECTIVES	23
VII-	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	24
VIII-	ANNEXES	27

Liste des abréviations

ANOVA: Analysis of Variance

B : Bleu

Bl : Blanc

cm: centimètre

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DLI: Daily Light Integral = Rayonnement lumineux quotidien intégrée

FKF1: Flavin-binding Kelch

FR : Far red

g : Gramme

h : Heure

h/Cycle : Heure par Cycle

h/j: Heure par jour

HLI : Hourly Light Integral= Rayonnement lumineux horaire intégré

HPS: High Pressure Sodium lamps = Lampes à vapeur de sodium sous haute pression

Kg : Kilogramme

Kg/KWh : Kilogramme par Kilo Watt heure

Kg/m² : Kilogramme par mètre carré

KgF/0.05 cm² : Kilogramme Force par 0.05 centimètre carré

KPa : KiloPascal

KWh/m² : Kilo Watt heure par mètre carré

LAI: Leaf Area Index = Indice de Surface Foliaire

LED: Light Emitting Diodes lamps = Lampes Diode Électro-Luminescente

LKP2: LOV Kelch Protein

m²: Mètre carré

mol/m²/j : Mol par mètre carré par jour

nm: Nanomètre

NS: Non Significatif

PAR: Photosynthetically Active Radiation = Radiations actives pour la photosynthèse

PCA: Principle Component Analysis

PFD: Photon Flux Density = Flux de Photon Photosynthétique

PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density = Densité du Flux de Photon Photosynthétique

R: Rouge

S: Semaine

TYLC: Tomato Yellow Leaf Curl virus

UV: Ultra-Violet

VPD : Vapour Pressure Deficit

W/m²: Watt par mètre carré

ZTL: Zeitlupe

μmol/m²/s : Micromol par mètre carré par seconde

% : Pourcent

€: Euro

°C : degré Celcius

Liste des annexes

Annexe I: DLI journalière entre août et avril.	27
Annexe II: Tableau représentatif des principales caractéristiques des systèmes d'éclairage Philips, Tootem (blanc et rouge) , Tootem (blanc) et l'éclairage naturel à l'intérieur et à l'extérieur de la serre avec des mesures prises à une distance de 20 cm des lampes à l'aide d'un spectrophotomètre (marque Gigahertz optik).....	27
Annexe III: Tableau représentatif des mesures prises à l'aide d'un spectrophotomètre (marque Gigahertz optik) sur trois niveaux de la plante: bas, milieu et haut avec les principales caractéristiques des systèmes d'éclairage Philips, Tootem (blanc et rouge) et Tootem (blanc).....	28
Annexe IV: Nombre d'heure en fonction du DPV (Vapour Pressure Deficit) le 5/3/2019	29
Annexe V: Nombre d'heure en fonction du DPV (Vapour Pressure Deficit) le 6/3/2019.....	29
Annexe VI: Eclairage de la société Tootem dans le feuillage de la culture de tomate (source personnelle).	30
Annexe VII: Eclairage de la société Philips dans le feuillage de la culture de tomate (source personnelle).	30
Annexe VIII: Concentration en caroténoïdes des différents systèmes d'éclairage.	31

Liste des tableaux

Tableau 1: Effet de l'éclairage sur la longueur des plantes, les valeurs ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles selon le test post hoc de Newman Keuls ($p>0.05$).	10
Tableau 2: Effet de l'éclairage sur le rendement commercialisable, le poids moyen des fruits commercialisable, le nombre de fruits verts/m ² et la croissance cumulée des plantes.	14
Tableau 3: Efficience énergétique des systèmes d'éclairage.	15
Tableau 4: Estimation du rendement des tomates jusqu'au mois de juin 2019.	15
Tableau 5: Estimation de la durée de vie des lampes LED de la société Philips selon les données du fournisseur.	15
Tableau 6: Estimation sur l'investissement du système d'éclairage de la société Philips par cycle de production.	15

Liste des figures

Figure 1: Spectres d'absorption des Chlorophyls a, b et Caroténoïdes (Spampinato, 2014).	23
Figure 2: Effets de la lumière bleue sur les processus physiologiques (carré bleu) et phases de développement d'une plante (carré gris). Les photorécepteurs de plantes absorbant les radiations bleues sont: PHOT, phototropins; CRY, cryptochromes; FKF1, Flavin-binding Kelch, PHY, phytochromes (Huché-Thélier et al., 2015).....	3
Figure 3: Effets de la lumière UV sur les processus physiologiques (carré orange) et phases de développement d'une plante (carré gris). Les photorécepteurs de plantes absorbant les rayons UV sont: PHOT, phototropines; CRY, cryptochromes; PHY, phytochromes; UVR8, UV RESISTANCE LOCUS 8 (Huché-Thélier et al., 2015).....	4
Figure 4: Comparaison entre les profils spectraux des deux systèmes d'éclairage et les rayonnements solaires extérieurs et intérieurs à la serre.	6
Figure 5: Profil spectral du système d'éclairage Philips.	6
Figure 6: Profil spectral du système d'éclairage Tootem (avec les bandes blanches et rouges).....	6
Figure 7: Schéma représentatif du positionnement des lampes LED dans le feuillage des plantes de tomate.	7
Figure 8: Plan de la Serre avec l'essai LED 2018/2019.	7
Figure 9: Elongation hebdomadaire des deux modalités de Climberley et du témoin.	10
Figure 10: Evolution hebdomadaire du diamètre moyen de la tige des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin.	10
Figure 11 : Evolution des stades de récolte et de floraison des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin.	11
Figure 12 : Indice de surface foliaire des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin. Selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$), les p values de gauche à droite selon les semaines sont : 0.326 NS et 0.408 NS.	11
Figure 13: Déficit de Pression de Vapeur des deux traitements d'éclairage et du témoin en fonction de l'heure de la journée et du HLI (Hourly Light Integral).	11
Figure 14: Taux de fermeté (Indice Durofel de 0 à 100) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$), les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.0007 ***, 0.022*, 1.23e-05 ***, 0.0001*** et 0.65NS.	12
Figure 15: Taux de fermeté avant et après conservation de la variété Climberley.....	12
Figure 16: Force du texturomètre (kgF/0,05 cm ²) pour les deux modalités d'éclairage et le témoin, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). p value de gauche à droite : 0.00365 **, 0.914 NS.....	12
Figure 17: Taux de matière sèche (%) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). Les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.0109 *, 2.3e-08 *** et $< 2e-16$ ***.	13
Figure 18: Taux de sucre (%Brix) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). Les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.169 NS, 0.648 NS, 0.0261 *, $< 2e-16$ ***, 0.0007*** et $< 2e-16$ ***.	13
Figure 19: Evolution de la charge en fruit des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin. ...	13

Figure 20: Evolution du rendement total commercialisable en cumulé (Kg/m ²) des deux modalités de la variété Climberley et du témoin jusqu'au mois d'avril 2019.	14
Figure 21: Consommation électrique cumulée des deux modalités d'éclairage et du chauffage total de la serre.....	14
Figure 22: Radar montrant les résultats de l'analyse sensorielle de la variété Climberley.....	15
Figure 23: Cercle de corrélation des variables	16
Figure 24: Carte factorielle des individus.....	16
Figure 25: Classification hiérarchique et regroupement.....	16

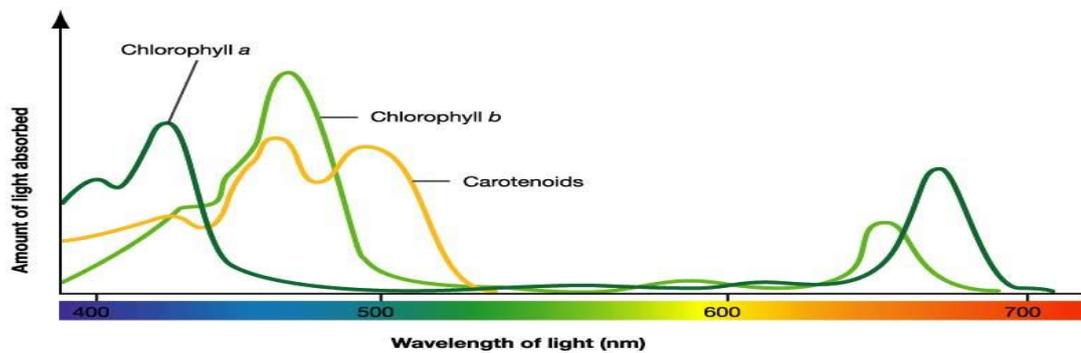


Figure 1: Spectres d'absorption des Chlorophyls a, b et Caroténoïdes (Spampinato, 2014).

I- INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est l'un des légumes les plus cultivés sous serre dans le monde et le plus consommé en France. Ce fruit a la capacité de fournir une valeur nutritive très importante et d'être une source importante de vitamines A, C, caroténoïdes, α tocophérols et composés phénoliques agissant comme antioxydants. La quantité et la qualité de ces composés est largement dépendante du génotype et des conditions environnementales (Hee-Sun Kook, 2013).

Une augmentation de la demande de consommation des tomates même pendant les périodes hivernales a poussé les producteurs à utiliser plusieurs sources d'éclairage d'appoint pour optimiser l'environnement de production et répondre aux besoins de la plante.

En effet, le développement des systèmes d'éclairage LED est considéré comme une innovation attirante pour les producteurs visant à cultiver sous serre une multitude de fruits et légumes. Ces lampes ont la capacité de fournir différents spectres lumineux perçus par les photorécepteurs des plantes qui vont engendrer des processus morphologiques et physiologiques spécifiques à la quantité et la qualité de l'éclairage reçu. Il a été rapporté que les spectres de lumière bleue, rouge et blanche sont considérés les plus utiles pour les plantes avec des absorptions maximales de chlorophylles a, b et caroténoïdes (Chang *et al.*, 2016) (Figure 1).

L'objectif de notre étude est de déterminer l'influence d'un éclairage artificiel d'appoint réalisé avec deux systèmes de lampes LED entre novembre 2018 et mars 2019. Le premier est celui de la société Philips avec 80% de LEDs rouges (660 nm) et 20% de LEDs bleues (440 nm). Le deuxième est celui de la société Tootem avec les bandes de lumière blanche (440 nm et 600 nm principalement) entre novembre 2018 et janvier 2019, et avec les bandes de lumière blanche (440 nm et 600 nm) et rouge (630 nm) entre février et mars 2019. Les deux systèmes sont installés dans le feuillage d'une culture de tomate. Quatre variétés sont testées: Climberley (Syngenta, grappe), Temptation (Enza Zaden, grappe), DR 0607TC (De Ruiter, cerise) et Brioso (Rijk Zwaan, cocktail) dans le cadre d'une culture hors-sol sous serre semi fermée située au CTIFL - Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes à Balandran. Les variétés utilisées ont été greffés et plantés le 7 août 2018 dans un substrat de laine de roche selon un système V avec des plants à 2 têtes. Seule la variété Climberley sera l'objet de notre rapport.

Cette étude nous permet d'évaluer l'effet des différents spectres lumineux sur le contrôle des paramètres physiologiques des cultures et qualités physico-chimiques des fruits tout en appréciant les coûts d'investissement et économies énergétiques.

1. La production de tomate en France

En France, la production de tomates (*Solanum lycopersicum*) pour le frais est estimée à 538 060 tonnes en 2018. Une baisse de 9 % par rapport à la moyenne 2013-2017 reflète principalement une tendance à la culture de variétés de petits calibres ayant donc des faibles rendements. La surface nationale cultivée pour le frais est 2 310 ha en 2018 et 87% de ces surfaces sont cultivés sous serre en abris hauts (Sédillot, 2018). La France est le sixième pays producteur de tomates de l'Union européenne après l'Italie, l'Espagne, le Portugal, la Grèce et les Pays-Bas. En France et aux Pays Bas, la plupart de la production est consommée en frais, cependant, les pays se situant sur la méditerranée ont une grande partie de leur production de tomates qui est destinée à la transformation et à l'industrie alimentaire (Avelin, 2018).

2. L'éclairage

L'éclairage est l'un des facteurs environnementaux les plus importants qui régule non seulement la photosynthèse mais aussi le développement et la croissance des plantes (Huché-Thélier *et al.*, 2015). En effet, dans le cas d'un éclairage réduit, la croissance de la plante et la qualité des produits diminuent ; par contre, dans le cas d'un éclairage excessif, la photosynthèse et le développement des plantes n'augmentent plus (Torres *et al.*, 2012) et dans certains cas, de graves conséquences comme les chloroses sur le feuillage et les fruits peuvent être observés (Heuvelink, 2005).

Alors, la quantité de la lumière (intensité x photopériode) et sa qualité sont des facteurs importants affectant les plantes (Lu *et al.*, 2012) et sont généralement imposés par l'objectif de production ; par exemple, les exigences en lumière pour la multiplication sont différentes de celles de la production de légumes, de plantes fleuries, de fleurs coupées, de petits fruits et de plantes aromatiques (Stapel, 2015).

Réellement, et en raison de l'interception de la lumière par l'infrastructure de la serre et les toiles d'ombrage, la réduction de l'éclairage naturel peut atteindre 30 à 80%, donc, la quantité effective de lumière transmise est beaucoup moins que prévu (Gislerød *et al.*, 2012). D'autres facteurs tels que la biomasse végétale, la condensation, les supports de culture et la poussière réduisent encore plus la transmission de la lumière (Faust, 2015). Selon Heuvelink, une réduction en lumière de 1%, même durant l'été, peut induire une réduction de 1% des récoltes (Heuvelink, 2005). Aujourd'hui, il est possible de modifier la qualité et la quantité de la lumière grâce aux récentes évolutions technologiques comme le développement des lampes Diode Electro Luminescente (LED) utilisés comme éclairage artificiel d'appoint (Demotes-Mainard *et al.*, 2016).

En effet, l'éclairage d'appoint présente de nombreux avantages pour un système de culture sous serre. Il permet une augmentation de la production/m² et par saison de 70 à 106% (Heuvelink, 2005) pendant l'hiver, en outre, des améliorations au niveau de la qualité du fruit en termes d'acidité, matière sèche et taux de sucres sont observées (Dzakovich *et al.*, 2015). En plus, l'éclairage artificiel donne des

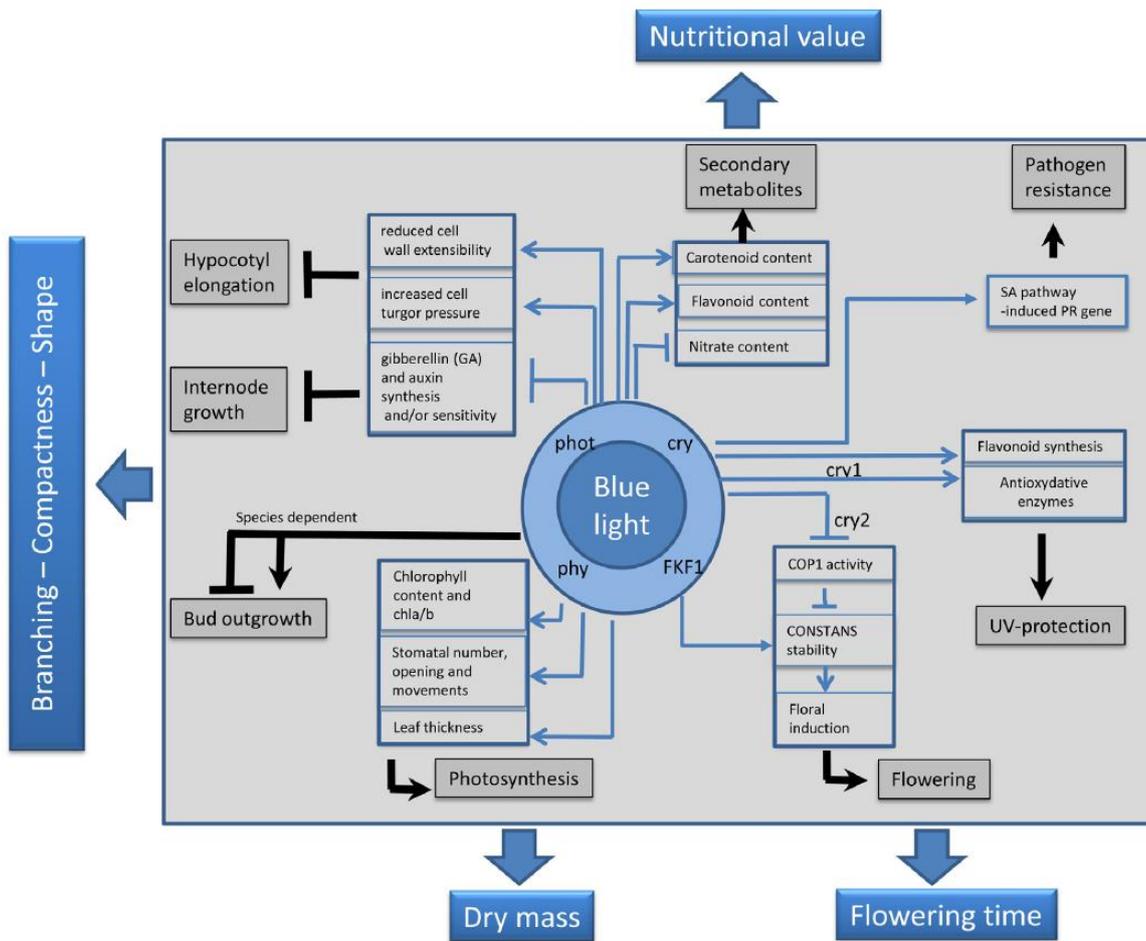


Figure 2: Effets de la lumière bleue sur les processus physiologiques (carré bleu) et phases de développement d'une plante (carré gris). Les photorécepteurs de plantes absorbant les radiations bleues sont: PHOT, phototropins; CRY, cryptochromes; FKF1, Flavin-binding Kelch, PHY, phytochromes (Huché-Thélier et al., 2015).

possibilités de production plus précoces ou tout au long de l'année et permet une demande de main-d'œuvre plus régulière (Heuvelink *et al.*, 2006).

3. Les photorecepteurs

La plante possède la capacité de détecter et agir face aux variations de l'éclairage grâce à plusieurs photorécepteurs qui absorbent des longueurs d'ondes spécifiques : les phototropines, les cryptochromes et la famille ZTL, FKF1, et LKP2 qui absorbent la lumière UV-A et bleue et les phytochromes qui absorbent la lumière rouge et rouge lointaine principalement et UV et bleu en moins (Huché-Thélier *et al.*, 2015). Des réponses physiologique et morphologique de la plante vont donc être observées à la suite de la perception de la lumière par les photorécepteurs qui peuvent également interagir entre eux (Abidi, 2013).

4. Effets de la lumière sur la photosynthèse et le développement des plantes

Plusieurs facteurs limitent l'activité photosynthétique des plantes comme l'azote foliaire (Marshall, 2000), la concentration en CO₂ (Jarvis, 1981) et la qualité et quantité de la lumière reçue. La génétique et les conditions environnementales présentes de l'anthèse à la récolte contrôlent strictement les paramètres de qualité des fruits de tomates (Riga *et al.*, 2008). Le PAR (Photosynthetically Active Radiation), est une fraction de la lumière dont les longueur d'onde sont comprises entre 400 et 700 nm qui peut être utilisée comme source d'énergie pour la photosynthèse par les plantes vertes (Mottus *et al.*, 2012). La qualité des fruits peut non seulement dépendre de la température mais aussi elle peut être variable en fonction du PAR (Riga *et al.*, 2008). Chaque espèce végétale a une intensité lumineuse optimale qui maximise sa photosynthèse et son développement (Torres *et al.*, 2012).

En effet, les spectres lumineux ont différentes conséquences sur l'activité photosynthétique et le développement des plantes. Les spectres de lumière bleu, rouge et rouge lointain ont les effets les plus importants sur la physiologie des plantes (Singh *et al.*, 2015). Les spectres de lumière UV (300-380 nm) influencent les maladies et les ravageurs dans les serres comme par exemple les populations de *Bemisia tabaci*, *Frankliniella occidentalis* et le virus TYLC (Hemming, 2011).

Les spectres de lumière bleue (400-500 nm) ont des effets importants sur la photomorphogenèse des plantes à travers les zeaxantines et phototropines (Abidi, 2013) et cryptochromes (Hogewoning *et al.*, 2010), surtout au niveau du control de l'activité des stomates qui peut influencer la transpiration, les échanges gazeux, le phototropisme (Massa *et al.*, 2008) et l'élongation de la tige (Nanya *et al.*, 2012). De même, ce spectre peut augmenter la biomasse végétative et les rendements des plantes de concombre et de tomates (Deram *et al.*, 2014) (Figure 2).

Il a été démontré que les spectres bleus peuvent augmenter l'activité photosynthétique chez quelques espèces de 30% mais les spectres rouges sont plus efficaces au niveau de la photosynthèse que les bleus

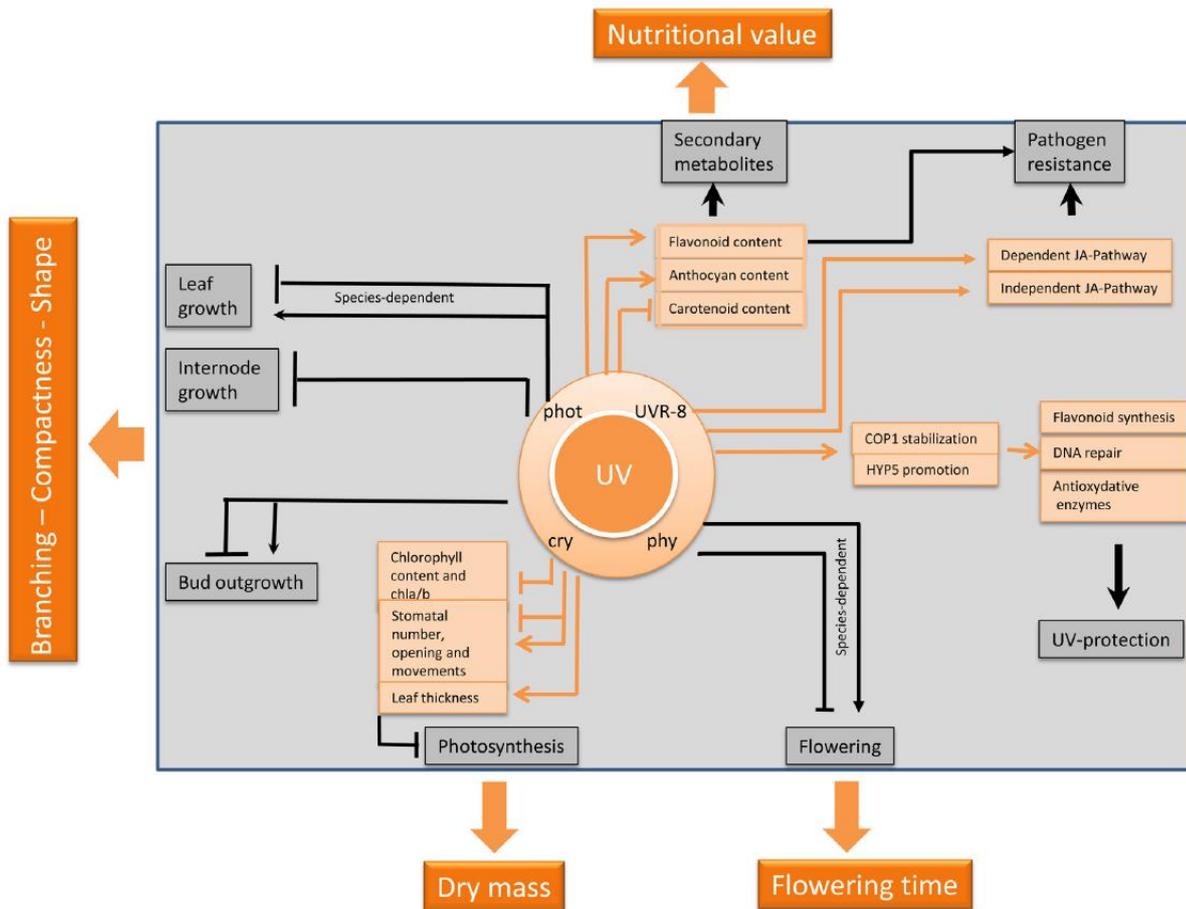


Figure 3: Effets de la lumière UV sur les processus physiologiques (carré orange) et phases de développement d'une plante (carré gris). Les photorécepteurs de plantes absorbant les rayons UV sont: PHOT, phototropines; CRY, cryptochromes; PHY, phytochromes; UVR8, UV RESISTANCE LOCUS 8 (Huché-Thélier et al.,2015).

parce que ces derniers peuvent inhiber le développement des feuilles en réduisant l'expansion des cellules et la quantité des chlorophylles dans les feuilles (Deram *et al.*, 2014).

En plus, les spectres rouges augmentent la synthèse des chlorophylles (Abidi, 2013), et les rendements (Singh *et al.*, 2015). Celles-ci ajoutées aux spectres rouge lointain (700-800), peuvent promouvoir la floraison et la croissance des plantes (Singh *et al.*, 2015). Les phytochromes sont identifiés comme photorécepteurs de spectres rouge et rouge lointain (Hemming, 2011).

La lumière verte est généralement considérée la lumière la moins efficace pour le développement des plantes (Lu *et al.*, 2012), mais l'orchestration des spectres verts avec les spectres rouges et bleus peut contribuer à un meilleur développement et croissance (Singh *et al.*, 2015). De plus, la lumière verte peut pénétrer dans la biomasse végétale plus profondément que la rouge ou la bleue et permet de contribuer à la photosynthèse des premières feuilles (Lu *et al.*, 2012). La lumière UVB est un modulateur des systèmes de défense de la plante (Ballaré, 2014) et possède aussi différents effets sur ses processus physiologiques (Figure 3).

5. Daily Light Integral (DLI)

Le terme Daily Light Integral (DLI) est utilisé pour décrire le nombre total de particules de lumière délivré au cours d'une journée entière. La DLI est exprimée en nombre de moles (particules lumière) par jour ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{j}$). Alors, la croissance des plantes est étroitement liée aux valeurs de la DLI (Faust, 2015). Les tomates nécessitent un minimum estimé de DLI de 22 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{j}$ pour une bonne production et certaines études ont montré que les cultures de tomates ont besoin de 30 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{j}$ de DLI pour maximiser les rendements (Morgan, 2013). En revanche, les plantules de tomates ont une exigence de DLI inférieure entre 4.8-6 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{j}$ augmentant au fur et à mesure du développement des plantes (Heuvelink, 2005). Une faible DLI peut largement limiter la qualité des fruits en termes de sucres, de poids sec et de saveurs (Morgan, 2013).

6. Les lampes HPS (High Pressure Sodium)

Traditionnellement, les lampes à vapeur de sodium (HPS) installés au-dessus des cultures sont généralement utilisées pour fournir un éclairage photosynthétique d'appoint sous serre (Gómez *et al.*, 2013). Mais le spectre PAR (Photosynthetically Active Radiation), comprenant les longueurs d'onde entre 400 et 700 nm, n'est pas tellement représenté par ces lampes. En effet, les spectres jaune, orange et infrarouge, qui sont peu importants à la photosynthèse des plantes, sont les plus représentés (Stapel, 2015). D'autre part, un éclairage continu avec les lampes HPS peut entraîner des troubles physiologiques chez certaines espèces comme la tomate (Ménard *et al.*, 2006) ou même causer des brûlures si elles sont proches des plantations. Cependant, ces lampes ne permettent pas une photosynthèse efficace, car une partie importante de l'énergie consommée est transformée en lumière de basse qualité et en chaleur (Stapel, 2015).

7. Les lampes LED (Light Emitting Diodes)

L'intégration des lampes LED dans les systèmes d'éclairage en horticulture a augmenté pendant la dernière décennie (Nájera *et al.*, 2018). Aujourd'hui, les LED continuent à se développer pour être de plus en plus économiques et appliqués sur des grandes échelles d'exploitations agricoles (Morrow, 2008). Actuellement, l'éclairage LED est une innovation en horticulture qui offre potentiellement de nouvelles opportunités pour la production, en maîtrisant l'intensité, la durée et la qualité de l'éclairage (Stapel, 2015). En fait, la technologie d'éclairage LED peut être non seulement utilisée dans les serres mais aussi dans les projets d'agriculture urbaine (Stapel, 2015), les projets de recherche en environnements contrôlés, et les cultures in vitro (Morrow, 2008).

Ces systèmes ont plusieurs propriétés bénéfiques, y compris leur composition spectrale, durabilité, longue durée de vie, spécificité de la longueur d'onde, surface émettrice froide, efficacité énergétique élevée (Bourget, 2008) et leurs effets sur les maladies, ravageurs et mécanismes de défense des plantes (Ballaré, 2014). Par conséquent, l'éclairage LED est à la fois économique en énergie et bénéfique aux plantes (Urrestarazu *et al.*, 2016).

Ce type d'éclairage permet d'agir sur la morphologie et le développement des plantes qui sont généralement influencés par les photorécepteurs des spectres bleus, rouges et rouges lointains (cryptochromes, phototropines et phytochromes) (Stapel, 2015). En plus, les LED ont une durée de vie très longue, 70% de leur puissance lumineuse d'origine est maintenue après 50 000 h de fonctionnement tant que les appareils sont refroidis (Olle and Viršile, 2013).

D'autre part, les systèmes les plus avancés des lampes LED sont dynamiques ayant des capteurs qui permettent de moduler dynamiquement la qualité et l'intensité spectrale en fonction de l'éclairage solaire disponible ou bien selon la proximité des plantes.

8. Objectifs de l'étude

D'après des études antérieures, l'éclairage photosynthétique a la capacité d'avoir des effets importants sur les qualités physico-chimiques des fruits de tomates ainsi que sur la morphologie et le rendement des plantes. L'objectif de cet essai est de comparer dans une serre semi fermée deux systèmes d'éclairage d'appoint LED à une culture de tomate hors sol non éclairée. Le but étant d'étudier l'effet des spectres lumineux bleus, rouges et blancs sur les cultures et leurs potentiels à améliorer les qualités physico-chimiques des fruits et leurs rendements commercialisables. Un bilan énergétique et économique permettra aussi d'évaluer l'intérêt des systèmes d'éclairages et leurs capacités d'être installés chez les producteurs de tomates.

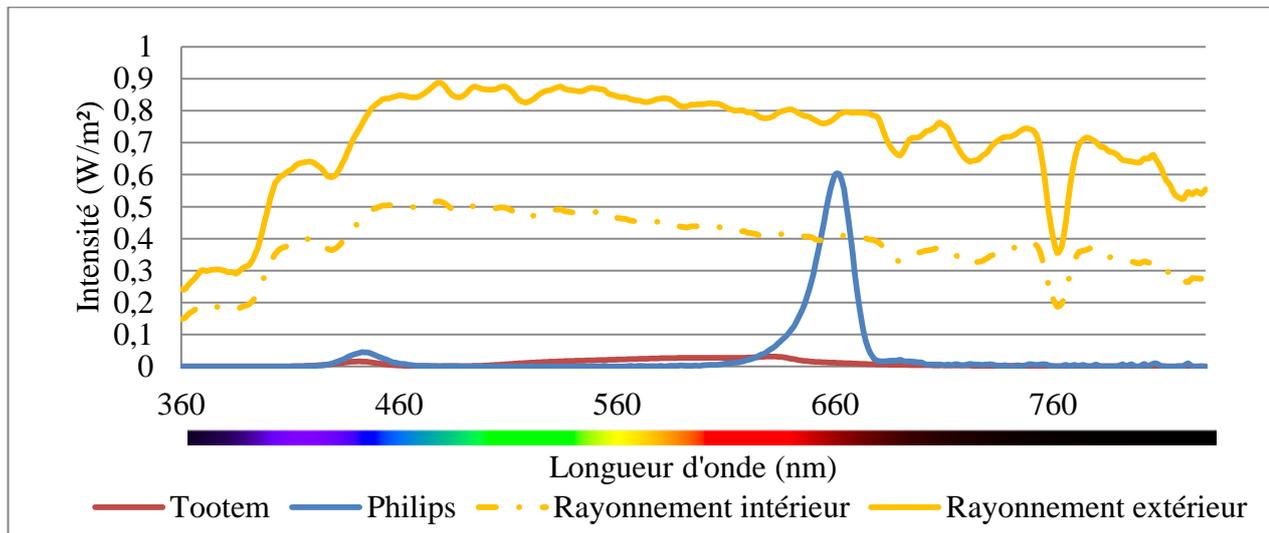


Figure 4: Comparaison entre les profils spectraux des deux systèmes d'éclairage et les rayonnements solaires extérieurs et intérieurs à la serre.

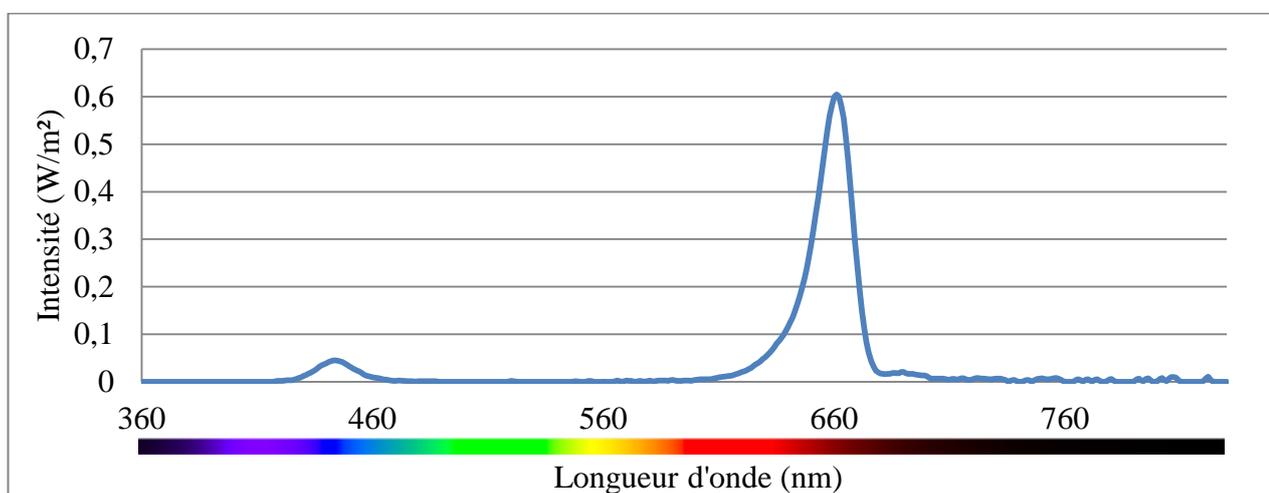


Figure 5: Profil spectral du système d'éclairage Philips.

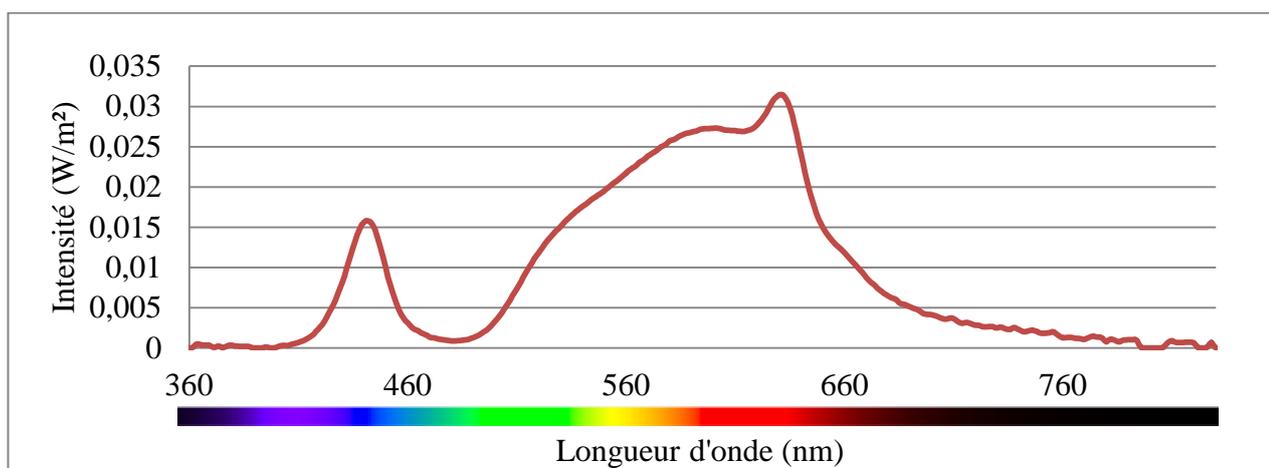


Figure 6: Profil spectral du système d'éclairage Tootem (avec les bandes blanches et rouges).

II- MATERIELS ET METHODES

1. Condition de culture

1.1. Dispositif expérimental

Deux systèmes d'éclairage LED avec des spectres de lumière différents sont testés dans une culture de tomate hors-sol sous serre semi fermée située au CTIFL - Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes à Balandran. Quatre variétés de tomate plantés le 7 août 2018 jusqu'au début du mois de juin 2019 sont utilisés: deux variétés grappes (Climberley et Temptation), une variété cerise (DR 0607TC) et une variété cocktail (Brioso). Seule la variété Climberley va être développée dans le rapport. La densité de plantation est de 2,4 têtes/m² ensuite elle a été augmentée à 3.6 têtes/m², à la fin de février. La pollinisation se fait par les bourdons (*Bombus terrestris*) et la protection phytosanitaire se fait par lutte intégrée en utilisant les *Macrolophus caliginosus*, *Encarsia formosa* et *Trichogramma achaeae*.

Traitement 1 : Lampes LED de la société Philips

1 rang de 30 m éclairé par des rampes doubles de lampes LED durant 18 h/j entre novembre 2018 et mars 2019. Le spectre de ce type d'éclairage est composé de 80% de LEDs rouges ayant une longueur d'onde autour de 660 nm et de 20% de LEDs bleues ayant une longueur d'onde autour de 440 nm. (Figure 4 et 5)

Traitement 2 : Lampes LED de la société Tootem

1 rang de 30 m éclairé par des rampes doubles de lampes LED durant 18 h/j. Ces lampes sont composées d'une double bande de 75% lumière blanche et 25% lumière rouge. Ce traitement a été éclairé avec les bandes de lumière blanche (440 nm et 600 nm principalement) entre novembre 2018 et janvier 2019, et avec les bandes de lumière blanche (440 nm et 600 nm) et rouge (630 nm) entre février et mars 2019 (Figures 4 et 6).

Témoin: Pas d'éclairage artificiel

1 rang de 30m planté de la variété Climberley avec aucun apport d'éclairage artificiel. Cette variété a reçu donc seulement un éclairage naturel du soleil (Figure 4). (Voir annexes II et III)

Chaque traitement possède 4 parcelles de 12 têtes, 2 parcelles sont exposées à l'est et 2 sont exposées à l'ouest. 10 plantes par modalité sont sélectionnées et marquées pour évaluer le développement de la culture. Des variétés de tomates jaunes (variété Lorenzo) et des bandes de couleur marqués sont utilisées pour la séparation entre les parcelles.

Les deux rampes dans les deux traitements sont disposées en interligne c'est à dire entre les deux bras des plants de tomates greffées. La première rampe a pour objectif d'éclairer la partie inférieure des plantes,

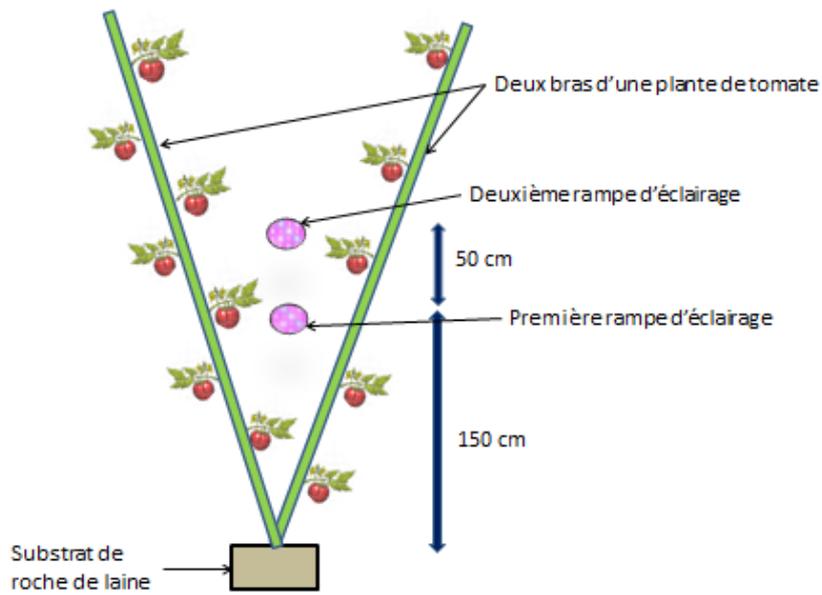


Figure 7: Schéma représentatif du positionnement des lampes LED dans le feuillage des plantes de tomate.

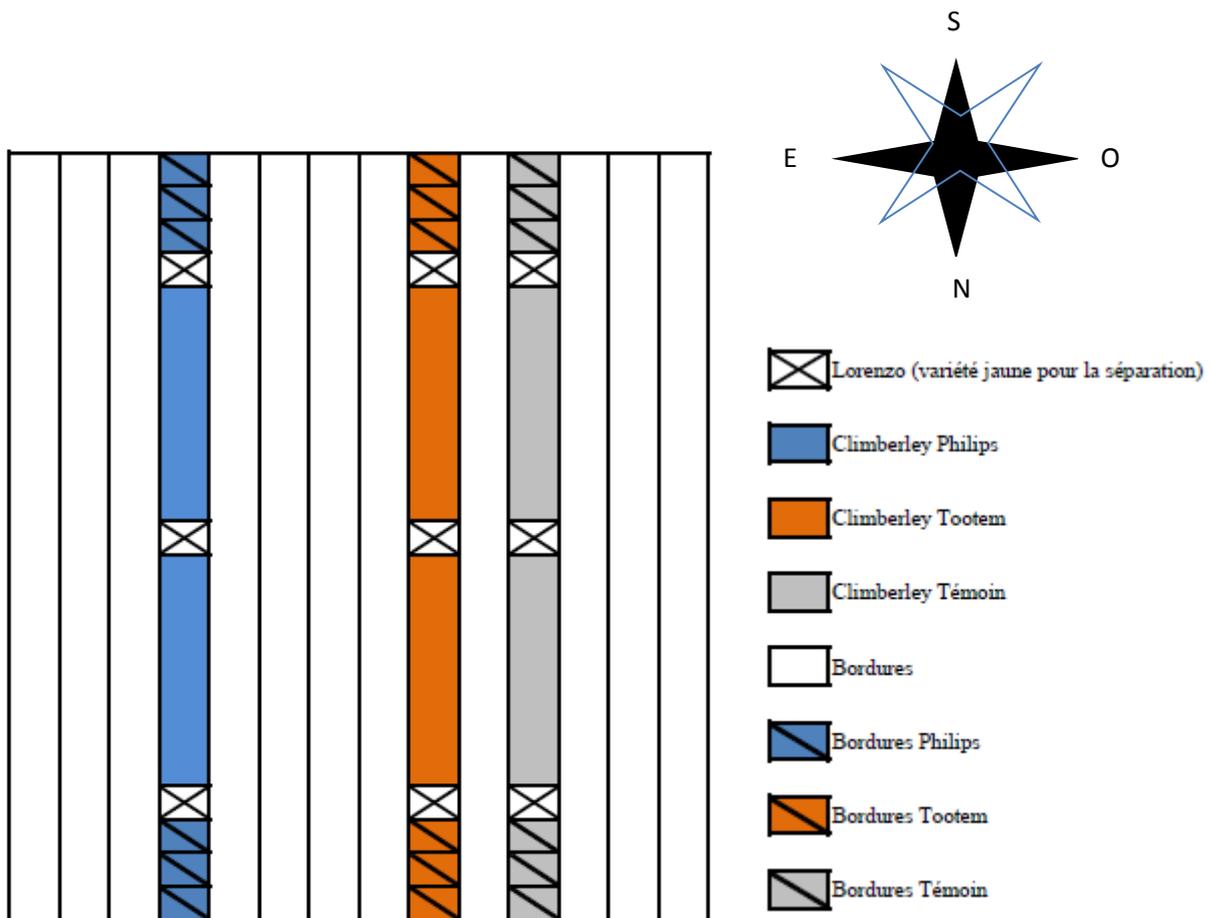


Figure 8: Plan de la Serre avec l'essai LED 2018/2019.

tandis que la seconde rampe qui est disposée 50 cm au-dessus de la première (soit 2m par rapport à la gouttière) a comme objectif d'éclairer la partie supérieure des plantes (Figures 7 et 8).

2. Développement des plantes

10 plantes sont repérées en début de culture pour mesurer les paramètres suivants:

2.1.Elongation des plantes

Sur la ficelle de palissage, et au niveau de l'apex de la plante, un repère est marqué chaque semaine, la distance entre les repères est mesurée.

2.2.Diamètre de tige

A l'aide d'un pied à coulisse, le diamètre le plus faible de la tige au niveau du repère de la semaine précédente est mesuré.

2.3.Stade de floraison

Le numéro du dernier bouquet en floraison et le nombre de fleurs épanouies par rapport à l'objectif de fruits par bouquet sont notés chaque semaine pour suivre la vitesse de développement de la culture. L'objectif d'une grappe de Climberley est d'avoir 5 fruits par grappe, alors, une plante portant 4 fleurs épanouies sur le deuxième bouquet (c'est à dire 4/5) sera notée : $2, (4/5)=2,8$

2.4.Stade de récolte

Le numéro du bouquet suivant à récolter est noté afin d'adapter le rythme de récolte et de décharge de la plante.

2.5.Charge en fruits sur les plantes

La quantité de fruits ayant un diamètre >5mm par plante est comptabilisée, cela permet d'évaluer la demande d'énergie liée à la fructification.

2.6.Leaf Area Index (LAI)

Elle est estimée par la formule suivante : $((\text{Longueur} \times \text{largeur} \times 0.33 \times \text{densité} \times \text{nombre de feuilles}) / 10000) - 0.25$. L'objectif pour une interception lumineuse optimale dans une culture de tomate est d'obtenir un LAI de 4, cet indicateur permet de raisonner l'effeuillage ainsi que la densité de la culture.

2.7.Vapour Pressure Deficit

6 plantes par traitement (trois à l'est et trois à l'ouest) sont équipées de capteurs pour mesurer la température des feuilles et des fruits (sonde pt100), ces mesures réalisées en continu vont permettre de calculer le déficit de pression vapeur (VPD).

Le VPD est la différence entre la quantité d'humidité dans l'air et la quantité d'humidité que l'air peut retenir lorsqu'il est saturé. Alors, la VPD est un indicateur du potentiel de condensation car

elle permet de déterminer la saturation de l'air de la serre (Prenger and Ling, 2001).

Toutes ces observations permettent d'adapter la conduite des plantes de tomates et d'observer leur vigueur et des possibles différences de comportement induites par les différents traitements d'éclairage LED sur la variété Climberley alors que le VPD va indiquer l'état de l'activité transpiratoire des plantes.

3. Qualités physico-chimiques des fruits

3.1. Taux de fermeté des fruits

Une mesure de la fermeté à l'aide d'un Durofel 25 est effectuée une fois par mois juste après la récolte à un stade de coloration 6-7 (code couleur CTIFL). Un échantillon de 30 fruits par modalité est pris en considérant que les premiers et derniers fruits d'une grappe ne sont pas représentatifs, 50% des fruits sont pris des parcelles au Nord et 50% des fruits sont pris des parcelles au Sud, 10 fruits sont prélevés par répétition, 2 mesures de fermeté pour chaque fruit à l'aide du Durofel électronique (marque SETOP) sont faites de côtés opposés sur chaque fruit. Les valeurs de fermeté sont comprises entre 0 et 100 selon l'indice Durofel.

3.2. Taux de fermeté après conservation

Des mesures de fermeté sont effectuées sur des lots de 30 fruits échantillonnés de la même façon après 7 jours de conservation au frigo à 18°C.

3.3. Texture des fruits

L'épiderme des fruits est enlevé ensuite les mesures de pénétration sont effectuées pour chaque fruit à l'aide d'un analyseur de texture (marque AMETEK).

3.4. Mesures colorimétriques

Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un chromamètre (marque KONIKA MINOLTA) pour quantifier les différences chromatiques dans les fruits selon les espaces de couleur L, a et b.

3.5. Taux de matière sèche dans les fruits

Le taux de matière sèche sur des lots de 30 fruits qui sont échantillonnés de la même façon est calculé pour chaque fruit en mesurant le poids frais le jour de la récolte et le poids sec après 8 jours de séchage en étuve à 70°C pour arriver à un poids constant.

3.6. Taux de sucre dans les fruits

Des lots de 30 fruits par modalité sont échantillonnés de la même façon. 10 fruits sont prélevés par répétition et broyés ensemble pendant 1 minute. Le broyat est ensuite centrifugé dans une centrifugeuse (marque Sigma) pendant 3 minutes à 4°C. Seul le surnageant est récupéré dans des flacons et sont utilisés pour la mesure d'IR. Pour chaque répétition, 2 mesures sont faites à l'aide d'un réfractomètre numérique (marque ATAGO). Les valeurs obtenues sont exprimés en degré Brix.

Toutes ces mesures permettent de montrer si les différents spectres lumineux de lampes LED influencent la qualité physico-chimique des fruits des cultures de tomates éclairés.

4. Production

Selon les exigences, les grappes commercialisables de Climberley ont un nombre de fruits allant de grappes à 7 fruits jusqu'à une grappe à 4 fruits. Ce nombre est maintenu par la taille des bouquets pour avoir un bon équilibre de plante (végétatif/génératif) et pour obtenir un stade de maturité homogène sur tous les fruits d'une même grappe. Pour chaque parcelle le nombre et le poids des grappes à 7, 6, 5 et 4 fruits sont relevés, de même pour les fruits en vrac, les fruits fendus, verts et tous autres déchets.

5. Bilan économique

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du système et dans l'objectif de réaliser un bilan énergétique et économique de la culture, un suivi de la consommation en énergie et en CO₂ est réalisé. De même, des relevés hebdomadaires de la consommation électrique des rampes d'éclairage LED sont réalisés.

6. Analyse sensorielle

Une dégustation réalisée par un panel de 13 personnes entraînées pour les différentes modalités de tomates a permis d'identifier les caractéristiques sensorielles des fruits (couleur, taille, côtelé, fermeté à la coupe, croquant, juteux, farineux, fondant, sucre, acide et arômes) du point de vue d'un consommateur.

En parallèle, des analyses physico-chimiques sont réalisées aux laboratoires du CTIFL de Saint Rémy de Provence pour mesurer les taux de matière sèche soluble, l'acidité totale, la vitamine C et les caroténoïdes sur les mêmes lots de fruits. Les résultats finals de ces analyses ne sont pas prêts pour être inclus dans le rapport.

7. Traitement statistique

L'analyse statistique est réalisée par le logiciel R à partir des données saisies tout au long de la culture. Après vérification de la normalité et de l'homoscédasticité des résidus, une ANOVA à 1 facteur est réalisée afin de déterminer s'il existe des différences significatives entre les traitements. Ensuite, un test de Newman Keuls est réalisé afin de classer les modalités. De même, une Analyse en Composantes Principales est faite sur quelques variables pour mettre en évidence les relations existantes entre elles et faire un regroupement des différentes modalités en fonction des variables qui les caractérisent.

Tableau 1: Effet de l'éclairage sur la longueur des plantes, les valeurs ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$).

Traitements	Longueur des plantes (cm)
Climberley Philips	860 a
Climberley Tootem	877.4 a
Climberley Témoin	870 a
p value	0.168 NS

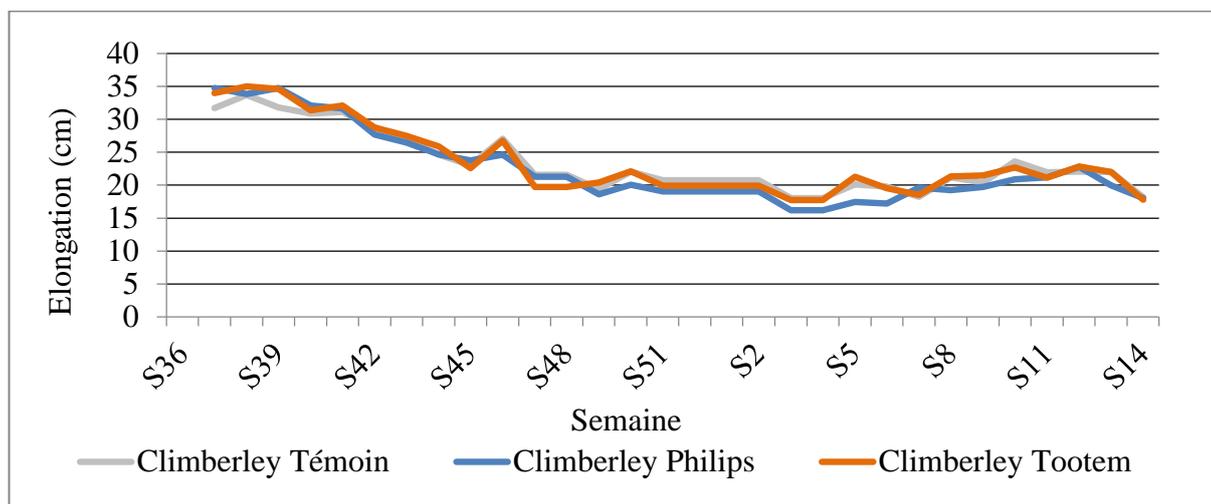


Figure 9: Elongation hebdomadaire des deux modalités de Climberley et du témoin.

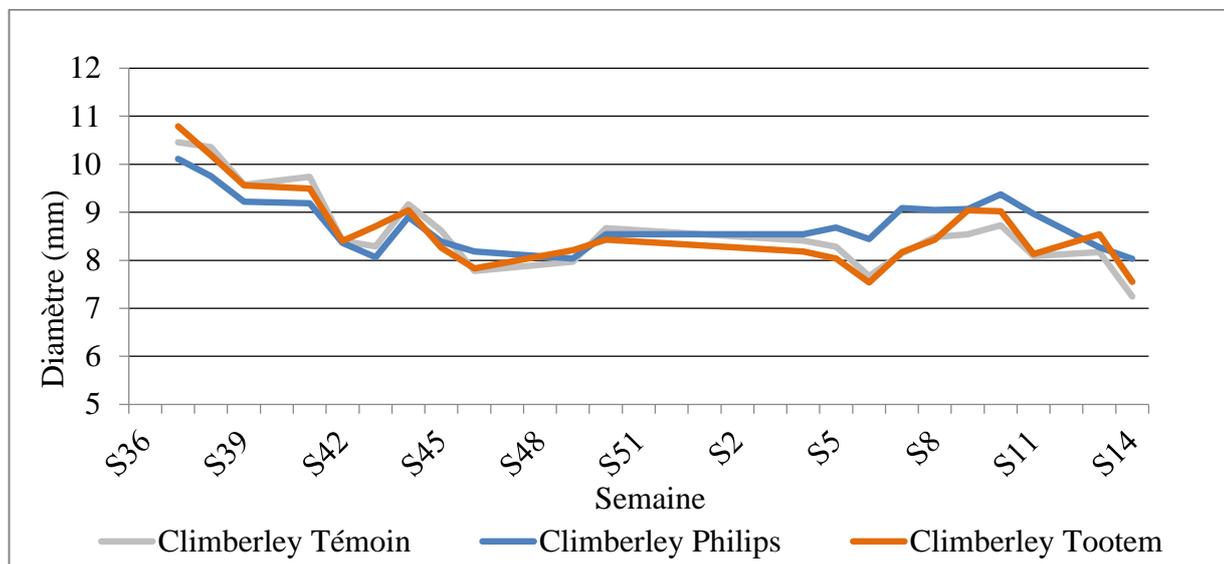


Figure 10: Evolution hebdomadaire du diamètre moyen de la tige des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin.

III- RESULTATS

1. Développement des plantes

1.1. Longueur des plantes

Le tableau 1 représente les mesures de croissances cumulées des deux modalités d'éclairage de la variété Climberley et du témoin jusqu'à la semaine 14. Ces mesures n'étaient pas affectées par le type d'éclairage artificiel. La longueur moyenne du témoin, de la modalité Philips et de la modalité Tootem sont respectivement: 870 cm, 860 cm et 877.4 cm.

1.2. Elongation

La figure 9 montre l'évolution de l'élongation hebdomadaire des deux modalités d'éclairage et du témoin. Ces élongations sont sensiblement les mêmes au cours de la saison et n'étaient pas donc influencés par les différents spectres de lumière. Les élongations les plus importantes (entre 31 et 35 cm) ont été observés au début du mois de septembre (S37) lorsque les plantes avaient des pics de croissance. Ensuite, elles ont commencé à diminuer progressivement entre S37 et S49 au début de décembre (20 cm) quand les plantes sont entrées dans leurs phases de production et l'éclairage naturel a diminué. A partir de janvier, les élongations restent plus ou moins stables avec une légère augmentation (23cm).

1.3. Diamètre de tige

La figure 10 montre l'évolution hebdomadaire du diamètre moyen de la tige des deux modalités d'éclairage testées et du témoin. Ces diamètres sont sensiblement les mêmes au cours de la saison et n'étaient pas donc influencés par les différents spectres d'éclairage. Les diamètres les plus importants ont été observés au début du mois de septembre (S37) lorsque les plantes étaient en phase de développement. Les valeurs étaient entre 10.1 et 10.8 cm, ensuite le diamètre commence à diminuer progressivement entre S36 et mi-novembre (S46) pour arriver à des moyennes de diamètre entre 7.83 et 8.18 cm quand les récoltes devenaient de plus en plus importantes. A partir de S46, le diamètre reste plus ou moins stable jusqu'à mi-février (S7).

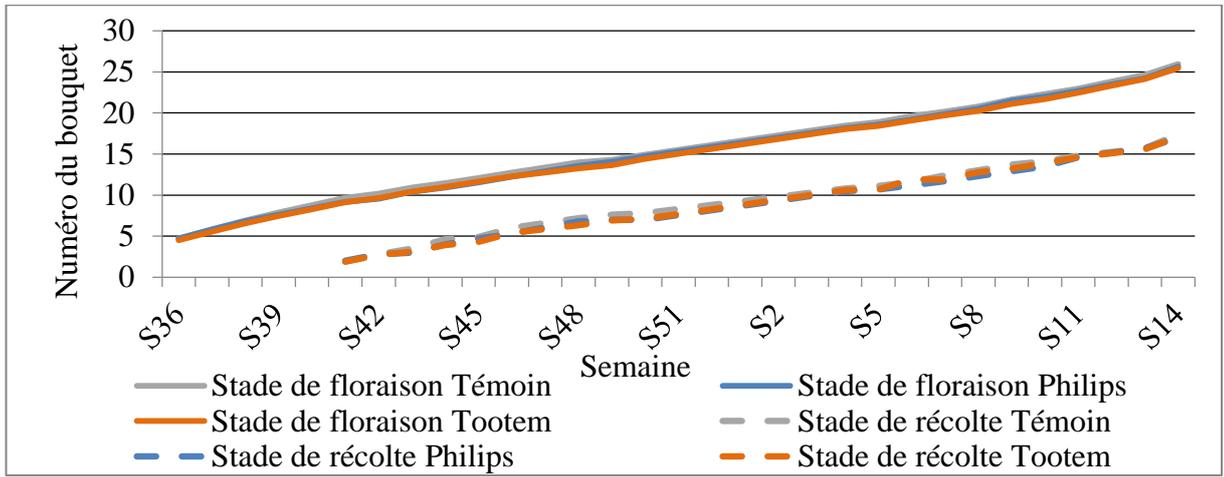


Figure 11 : Evolution des stades de récolte et de floraison des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin.

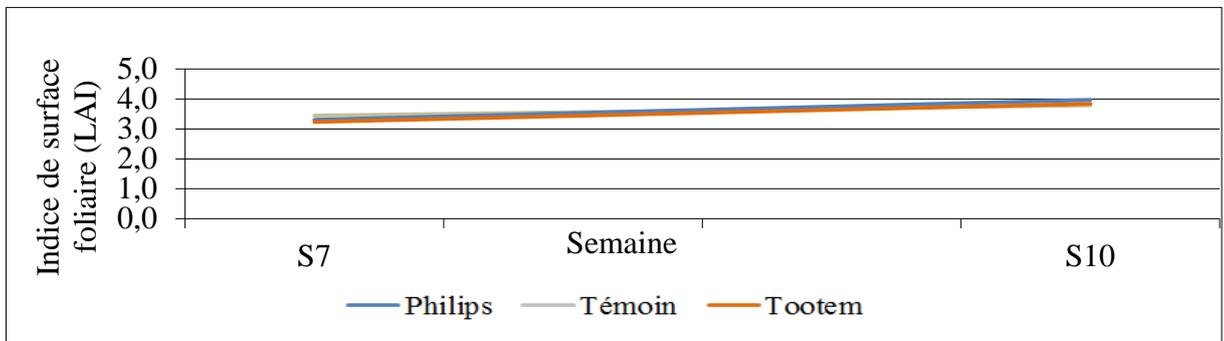


Figure 12 : Indice de surface foliaire des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin. Selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$), les p values de gauche à droite selon les semaines sont : 0.326 NS et 0.408 NS.

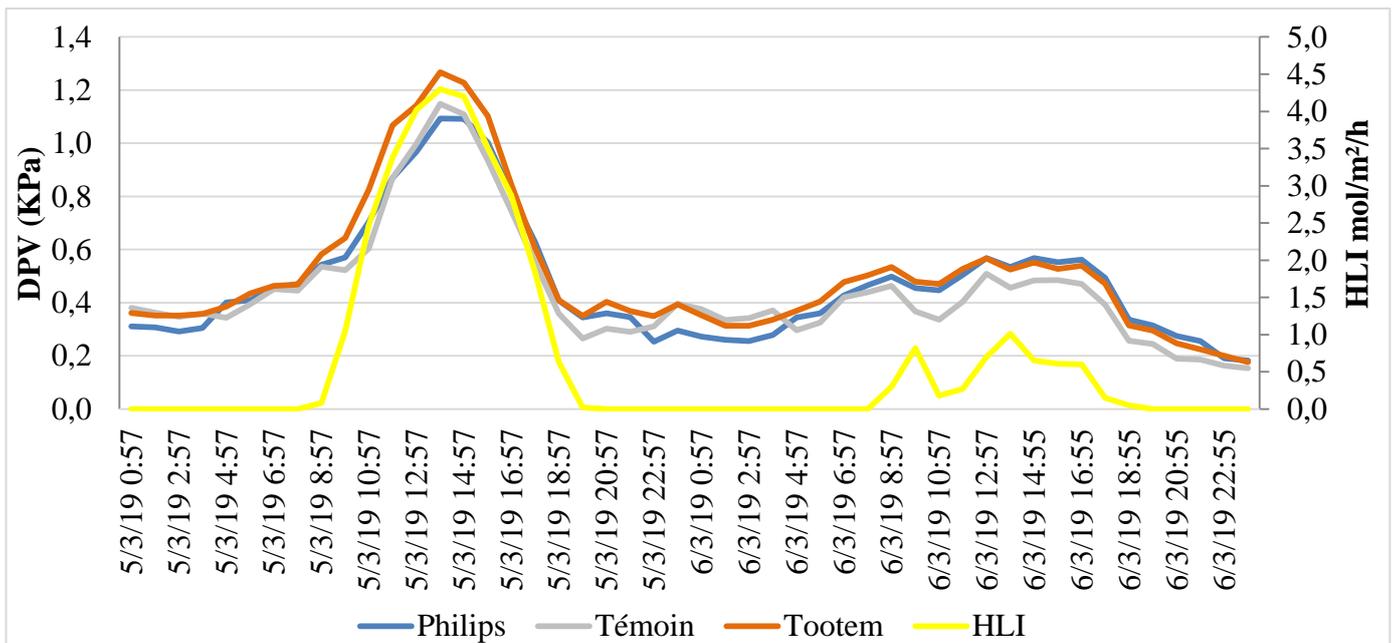


Figure 13: Déficit de Pression de Vapeur des deux traitements d'éclairage et du témoin en fonction de l'heure de la journée et du HLI (Hourly Light Integral).

1.4. Stades de floraison et de récolte

La figure 11 montre que pour les deux modalités d'éclairage testées et le témoin, les stades de floraison et de récolte évoluent à la même vitesse. En plus, une légère diminution de vitesse de floraison et de décharge est observée au cours de la saison. Le 5^{ème} bouquet qui a fleuri la première semaine de septembre (S36) avait besoin de 9 semaines pour être récolté la première semaine de novembre (S45). En revanche, le 10^{ème} bouquet qui a fleuri en mi-octobre (S42) avait besoin de 12 semaines pour être récolté début janvier (S2).

1.5. Leaf Area Index (LAI)

La figure 12 montre une légère augmentation de l'indice de la surface foliaire entre la semaine 7 et la semaine 10, les LAI sont aussi sensiblement les mêmes pour les deux modalités d'éclairage testées et le témoin. Théoriquement, une LAI de 4, signifiant 4 m² de feuilles pour 1 m² de sol est la valeur optimale (Heuvelink, 2005). D'après la figure, la LAI la plus faible était pour l'éclairage blanc et rouge de la société Tootem (3.8) et la LAI la plus élevée était pour l'éclairage bleu et rouge de la société Philips (4). La différence entre les LAI des deux modalités d'éclairage et du témoin n'était pas significative.

1.6. Vapour Pressure Deficit

La figure 13 présente le Déficit de Pression de Vapeur des deux systèmes d'éclairage et du témoin sur deux journées successives en fonction de la HLI (Hourly Light Integral). La première journée est celle du 5/3/2019 qui est considérée comme ensoleillée et la deuxième journée est celle du 6/3/2019 qui est considérée une journée sombre. La différence du DPV entre les deux journées est nette. En plus, les courbes sont quasiment superposées avec quelques différences au cours de la journée. Les tableaux dans l'annexes IV et V montrent que le système d'éclairage Philips avait le plus de nombre d'heure ayant un DPV entre 0.6 et 1 KPa pendant la journée ensoleillée alors que la majorité des valeurs de DPV étaient comprises entre 0.2 et 0.6 KPa pendant la journée sombre.

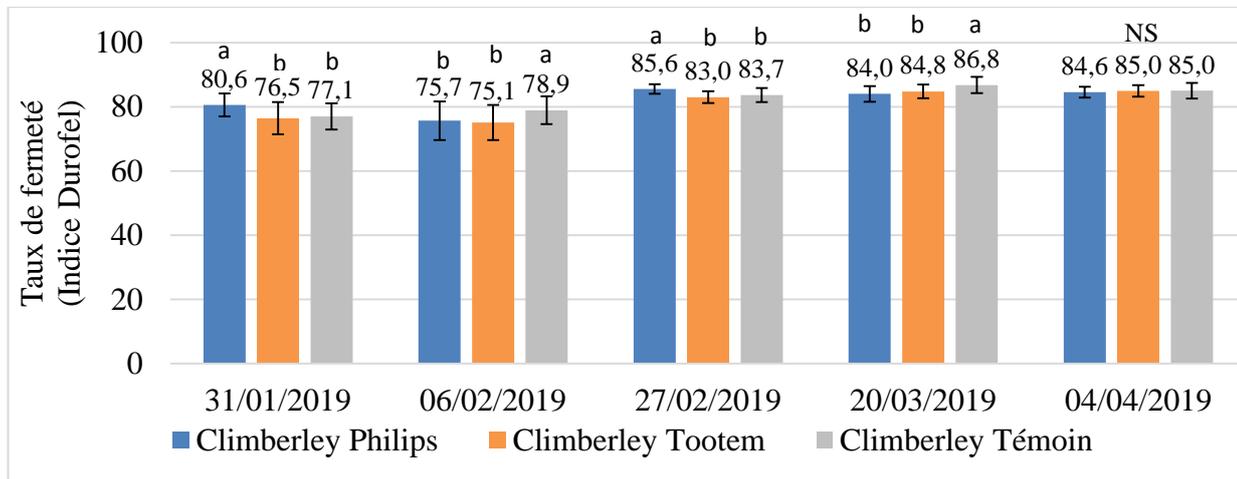


Figure 14: Taux de fermeture (Indice Durofel de 0 à 100) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$), les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.0007 ***, 0.022*, 1.23e-05 ***, 0.0001*** et 0.65NS.

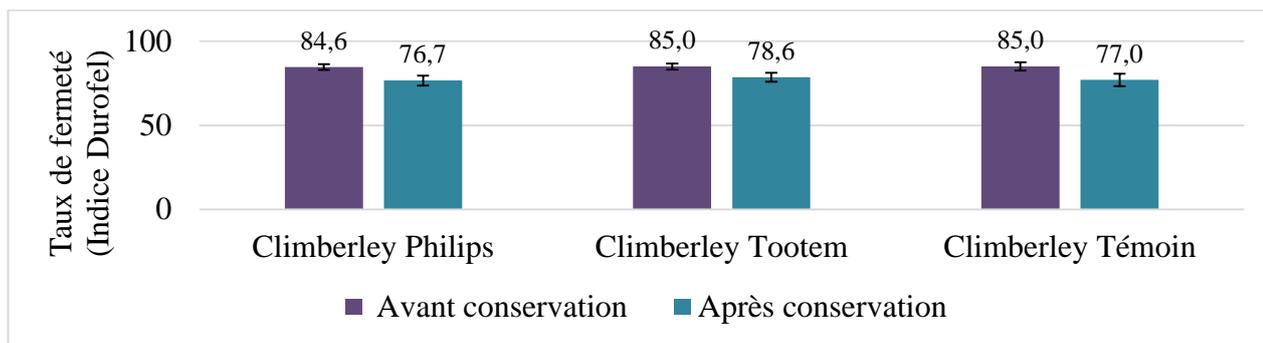


Figure 15: Taux de fermeture avant et après conservation de la variété Climberley.

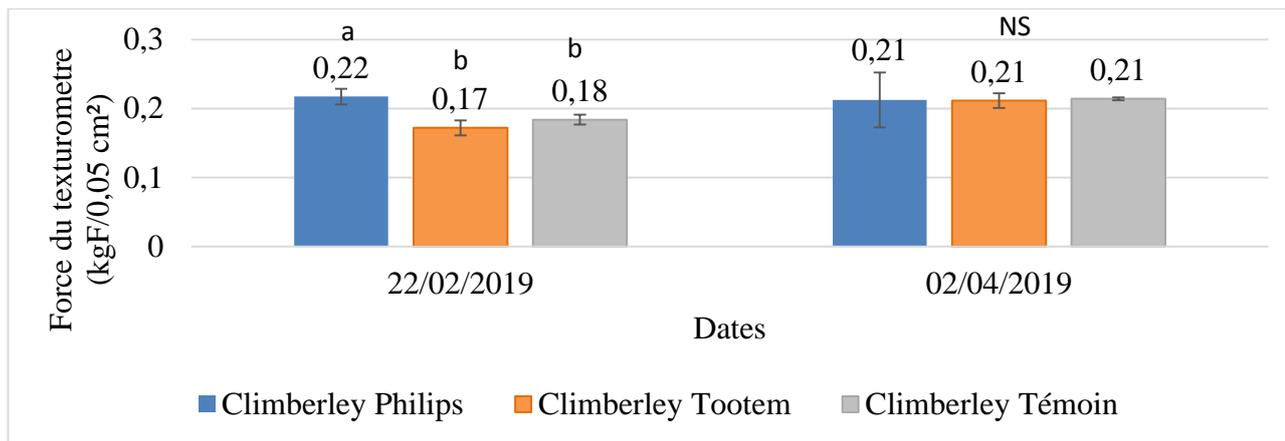


Figure 16: Force du texturomètre ($\text{kgF}/0,05 \text{ cm}^2$) pour les deux modalités d'éclairage et le témoin, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). p value de gauche à droite : 0.00365 **, 0.914 NS.

2. Qualités physico-chimiques des fruits

2.1. Taux de fermeté des fruits

La figure 14, pour les taux de fermeté mesurés entre la fin du mois de janvier 2019 et le début du mois d'avril 2019, montre une tendance à une augmentation pour les deux modalités d'éclairages testés et le témoin. La première mesure faite le 31/01/2019 montre un taux de fermeté élevé pour les Climberleys éclairés par les lampes de Philips ayant des pics de spectres bleus et rouges (80.6 Indice Durofel) qui est significativement supérieur aux rangs éclairés par les lampes de Tootem ayant des spectres de lumière blanche et rouge (76.5 Indice Durofel) ou au témoin qui n'est pas éclairé artificiellement (77.1 Indice Durofel).

Les mesures faites une semaine plus tard (06/02/2019) révèlent d'autres résultats, c'est le témoin non éclairé artificiellement qui a le taux de fermeté le plus important (78.9 Indice Durofel) et qui est de même différent significativement des deux types d'éclairage, Philips (75.7 Indice Durofel) et Tootem (75.1 Indice Durofel).

Les mesures du 20/03/2019 montrent un taux de fermeté important pour le témoin (86.8 Indice Durofel) qui est supérieur significativement aux modalités éclairés (84 Indice Durofel pour Philips et 84.8 Indice Durofel pour Tootem).

La dernière date des mesures de taux de fermeté (04/04/2019) montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les moyennes des deux modalités d'éclairage et du témoin qui étaient 84.6, 85 et 85 Indice Durofel pour Philips, Tootem et le témoin respectivement.

La figure 15 montre l'effet de la conservation sur les fruits. Après une conservation de 7 jours des lots de fruits échantillonnés le 04/04/2019, leurs taux de fermeté ont diminué de 9.33%, 7.52% et 9.41% pour les modalités éclairées par Philips, Tootem et le témoin respectivement. Même après conservation, les nouvelles moyennes de fermeté n'avaient pas de différences significatives entre elles avec une p value de 0.0503.

2.2. Texture des fruits

La texture des fruits a été mesurée sur deux dates différentes. Les résultats du 22/02/2019 de la figure 16 montrent que les spectres bleus et rouges des lampes LED de la société Philips avaient des fruits avec une texture plus importante (0.22 kgF/0,05 cm²) que les fruits éclairés par des spectres de lumière blanche et rouge de la société Tootem (0.17 kgF/0,05 cm²) ou le témoin (0.18 kgF/0,05 cm²).

Cependant, les mesures de texture faites le 02/04/2019 montrent que malgré la légère augmentation, il n'y avait pas de différence significative entre les modalités testées (0.21 kgF/0,05 cm²).

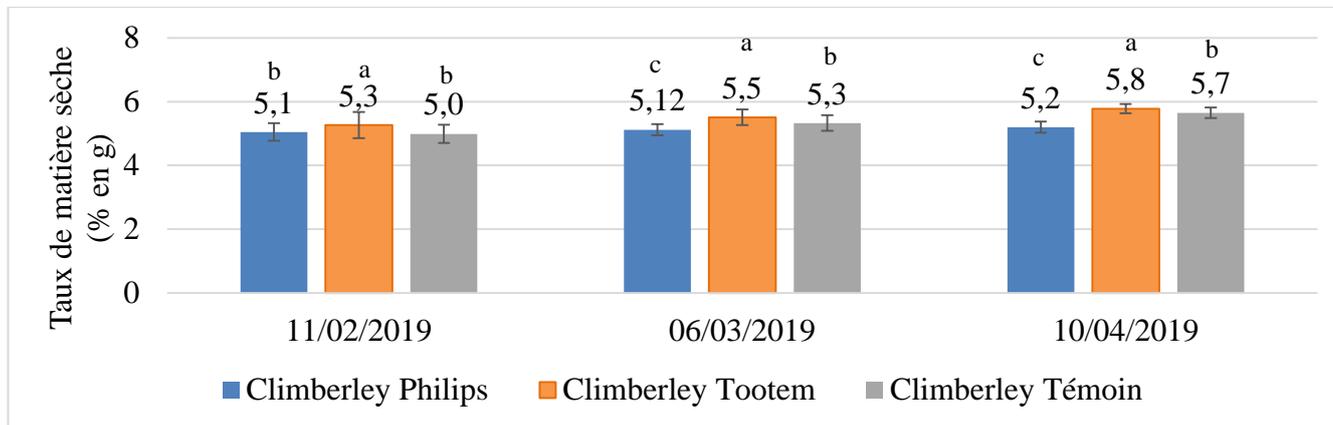


Figure 17: Taux de matière sèche (%) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). Les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.0109 *, 2.3e-08 *** et $< 2e-16$ ***.

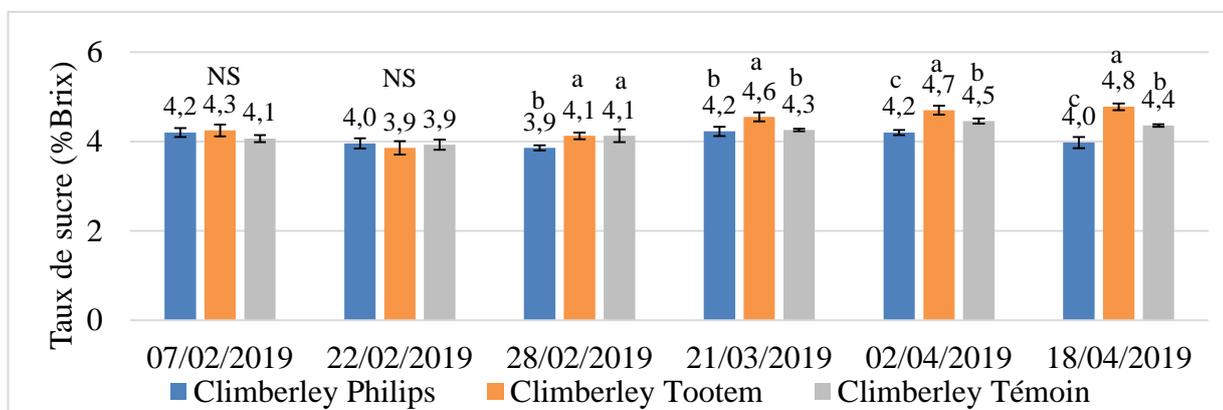


Figure 18: Taux de sucre (%Brix) pour les différentes modalités de la variété Climberley selon les dates de mesures, les barres ayant les mêmes lettres n'ont pas de différences significatives entre elles pour chaque date selon le test post hoc de Newman Keuls ($p > 0.05$). Les p values de gauche à droite selon les dates sont : 0.169 NS, 0.648 NS, 0.0261 *, $< 2e-16$ ***, 0.0007*** et $< 2e-16$ ***.

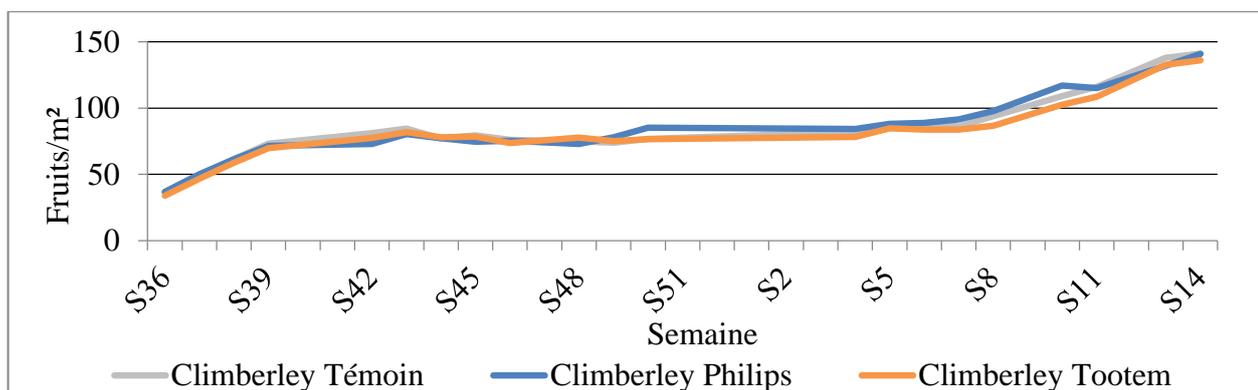


Figure 19: Evolution de la charge en fruit des deux modalités d'éclairage de Climberley et du témoin.

2.3. Taux de matière sèche dans les fruits

Le taux de matière sèche a augmenté légèrement entre 11/02/2019 et 10/04/2019 pour les deux modalités de Climberley et le témoin (Figure 17). Les fruits éclairés par les spectres blanc et rouge de la société Tootem ont eu les taux de matière sèche les plus élevés 5.3%, 5.5% et 5.8% pour les trois dates respectivement.

Pour la première date du 11/02/2019, le témoin et le deuxième type d'éclairage de Philips avaient des taux de matières sèches non différents significativement de 5.1% et 5% respectivement tandis que pour la deuxième et troisième date, les taux de matière sèche du témoin étaient supérieurs à ceux des fruits éclairés par les spectres rouges et bleus de la société Philips.

2.4. Taux de sucre dans les fruits

Le taux de sucre pour les deux premières dates n'était pas affecté par les différents types d'éclairage, et la différence entre les moyennes était donc non significative (Figure 18). A partir du 28/02/2019, les taux de sucres pour les tomates exposées à l'éclairage blanc et rouge fournis par Tootem ont une légère augmentation et deviennent plus importants comparé aux tomates exposées à la lumière bleue et rouge fournie par Philips et au témoin avec des différences significatives entre leurs moyennes.

3. Production

3.1. Charge en fruits sur les plantes

La figure 19 montre l'évolution de la charge en fruits des deux modalités d'éclairage testées et du contrôle entre début septembre et début avril 2019. Cette évolution est sensiblement la même au cours de la saison et n'était pas donc influencée par les différents spectres d'éclairage.

Le nombre de fruits /m² augmente au début de la saison quand l'éclairage naturel et les températures étaient plus favorables jusqu'à atteindre un plateau (77 fruits/m²) vers la semaine 41 en octobre, ensuite, à partir de la fin du mois de janvier (S5), la charge en fruits continue son augmentation pour arriver à 140 fruits/m² au début du mois d'avril.

3.2. Rendement commercialisable total

Au début de la saison, les 2 types d'éclairages avaient le même effet sur le rendement qui été inférieur à celui du témoin jusqu'à la fin du mois de décembre où la courbe du rendement des plantes exposées à la lumière bleue et rouge de Philips commence à augmenter pour dépasser le témoin.

Le test post hoc de Newman Keuls réalisé après l'ANOVA montre qu'il y avait des différences significatives pour la moyenne des rendements/m² entre les deux types d'éclairage qui sont la lumière bleue et rouge (28.5 Kg/m²) et la lumière blanche et rouge (23 Kg/m²) mais qu'il n'y a pas de différences

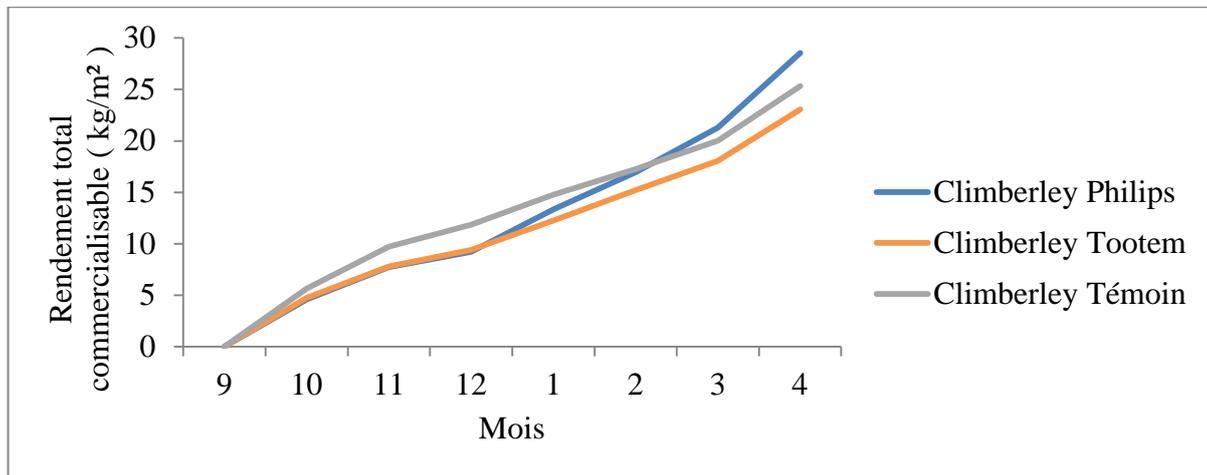


Figure 20: Evolution du rendement total commercialisable en cumulé (Kg/m²) des deux modalités de la variété Climberley et du témoin jusqu'au mois d'avril 2019.

Tableau 2: Effet de l'éclairage sur le rendement commercialisable, le poids moyen des fruits commercialisable, le nombre de fruits verts/m² et la croissance cumulée des plantes.

Traitements	Rendement commercialisable (Kg/m ²)	Poids moyen des fruits commercialisables (g)	Nombre de fruits verts/m ²
Climberley Philips	28.5 a	132 a	7.3 a
Climberley Tootem	23 b	109.9 b	9.6 a
Climberley Témoin	25.3 ab	119.1 b	8.5 a
p value	0.0237*	0.00233**	0.465 NS

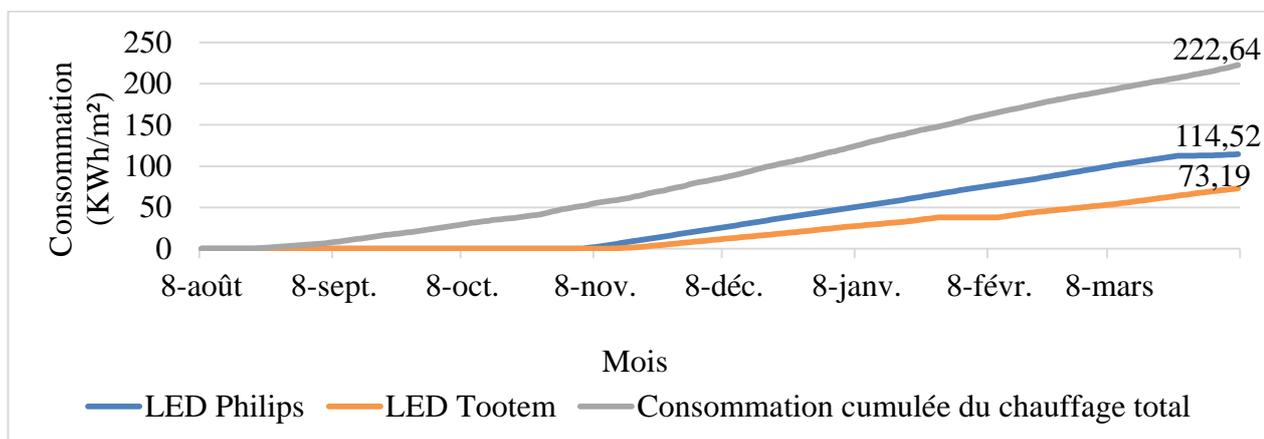


Figure 21: Consommation électrique cumulée des deux modalités d'éclairage et du chauffage total de la serre.

significatives pour la moyenne des rendements/m² entre les deux types d'éclairage et le témoin non éclairé (25.3 Kg/m²) (Figure 20).

3.3.Poids moyen des fruits commercialisables

Le tableau 2 montre qu'il y avait un effet significatif de l'éclairage sur le poids moyen des fruits commercialisables. En fait, les spectres bleus et rouges des lampes LED de la société Philips ont induit le poids moyen des fruits le plus important (132.2g). Les spectres blanc et rouge des lampes LED de la société Tootem avaient une moyenne de poids de fruits (109.9 g) qui n'est pas significativement différent du témoin non éclairé (119.1 g).

3.4.Fruits verts non commercialisables

Le tableau 2 montre qu'il n'y a pas d'effet d'éclairage sur la coloration des fruits de la variété Climberley. Le nombre de fruits verts le plus faible (7.3 fruits/m²) a été remarqué chez les plantes de tomates qui ont été éclairé par les LED rouges et bleues de la société Philips, mais il n'y avait pas une différence significative avec le deuxième type d'éclairage blanc et rouge de la société Tootem (9.6 fruits/m²) ni avec le témoin (8.5 fruits/m²).

4. Bilan économique

4.1.Consommation électrique

La figure 21 montre la consommation électrique cumulée en KWh/m² pour les deux systèmes d'éclairage comparés au cours de l'étude avec la consommation électrique cumulée du chauffage total de la serre. La serre a été éclairée entre le début du mois de novembre et la fin du mois de mars. Une consommation plus importante chez le système de la société Philips ayant des spectres d'éclairage rouge et bleu est remarquée qui dépasse celle du système de la société Tootem tout le long de la saison jusqu'à arriver à une consommation cumulée de 114.52 KWh/m² fin mars tandis que la consommation totale du système de la société Tootem était de 73.19 KWh/m². Alors ce dernier a consommé 36.1 % en moins de l'électricité au cours de la saison. La figure montre aussi un plateau entre la dernière semaine de janvier et la première semaine de février, cela est dû à un problème de fonctionnement dans le système de la société Tootem. La comparaison entre les trois courbes de consommation électrique montre que les systèmes d'éclairage peuvent représenter 30% de la consommation énergétique totale.

Tableau 3: Efficacité énergétique des systèmes d'éclairage.

Type d'éclairage	Consommation électrique des LED (KWh/m ²)	Rendement commercialisable (Kg/m ²)	Efficacité énergétique (Kg/KWh)
Philips	114.52	28.54	0.24
Tootem	73.19	23.04	0.31
Témoin	-	25.33	-

Tableau 4: Estimation du rendement des tomates jusqu'au mois de juin 2019.

Rendement (Kg/m ²)		
Climberley Philips	Climberley Tootem	Climberley Témoin
43.03	32.98	35.94

Tableau 5: Estimation de la durée de vie des lampes LED de la société Philips selon les données du fournisseur.

Capacité d'éclairage (Heures)	Utilisation des LED (Jours)	Durée d'éclairage (h/j)	Durée d'éclairage (h/Cycle)	Durée de vie des LED (Cycles de production)
25000(90%)	150	18	2700	9.3
50000(70%)	150	18	2700	18.5

Tableau 6: Estimation sur l'investissement du système d'éclairage de la société Philips par cycle de production.

Traitement	Rendement (Kg/m ²)	Hausse de production par cycle (Kg/m ²)	Prix de vente des tomates grappe (€/kg)	Gain brut par cycle (€/m ²)	Gain net par cycle (€/m ²)
Climberley Philips	43.03	7.09	1.4	9.93	-1.52

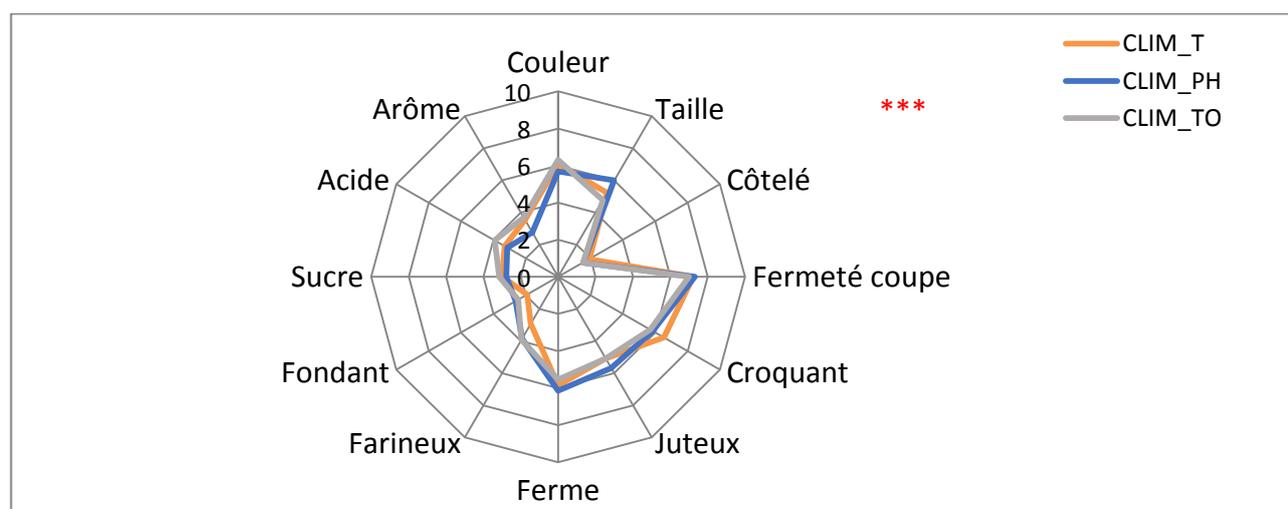


Figure 22: Radar montrant les résultats de l'analyse sensorielle de la variété Climberley.

4.2.Efficience énergétique

Le tableau 3 compare la consommation électrique des deux systèmes d'éclairage LED. Le premier système de la société Philips avait une efficience énergétique de 0.24 Kg/KWh alors que le deuxième système de la société Tootem avait une efficience énergétique de 0.31 Kg/KWh. Alors l'efficience énergétique du système Tootem était supérieure à celle du système Philips de 22.6%.

4.3.Bilan

Une estimation des rendements jusqu'à la fin du mois de juin a été faite (Tableau 4) avec une estimation de la durée de vie des lampes LED de la société Philips (Tableau 5), selon les données du fournisseur, pour pouvoir évaluer l'investissement des systèmes d'éclairage dans la culture hors sol sous serre des tomates. Le tableau 6 montre les résultats de l'étude de l'investissement du système Philips. Avec une hausse de production par cycle de 7.09 Kg/m² et des prix de vente de 1.4 €/kg, les gains d'un producteur de tomate ne permettent pas de couvrir les coûts de consommation électrique de l'éclairage (11.45 €/m²) ni les coûts d'installation de ce système (120 €/m²). Sachant que : Gain net= Gain brut - (consommation électrique des LED) et le prix d'1KWh=0.1€.

5. Analyse sensorielle

Des analyses sensorielles ont été réalisées par un panel expérimenté sur 12 critères pour les variétés de tomates étudiées en parallèle aux analyses physico-chimiques au laboratoire de Saint Rémi de Provence. Les résultats de la variété Climberley sont présentés dans la figure 22. L'analyse de variance au seuil de 5%, montre que les échantillons ne sont pas significativement départagés pour la majorité des descripteurs. En termes de taille, le traitement statistique indique qu'il existe des différences significatives entre les trois modalités testées avec une p value de 0,0003 ***. Les tomates éclairées par Philips ont un diamètre significativement plus grand que celles éclairées par Tootem et le Témoin.

6. ACP générale

Dix variables mesurées sont analysées en utilisant l'Analyse en Composantes Principales pour pouvoir déterminer la contribution de la variable étudiée sur l'axe, mettre en évidence les relations existantes entre les différentes variables et par conséquent faire un regroupement des différentes modalités en fonction des variables qui les caractérisent.

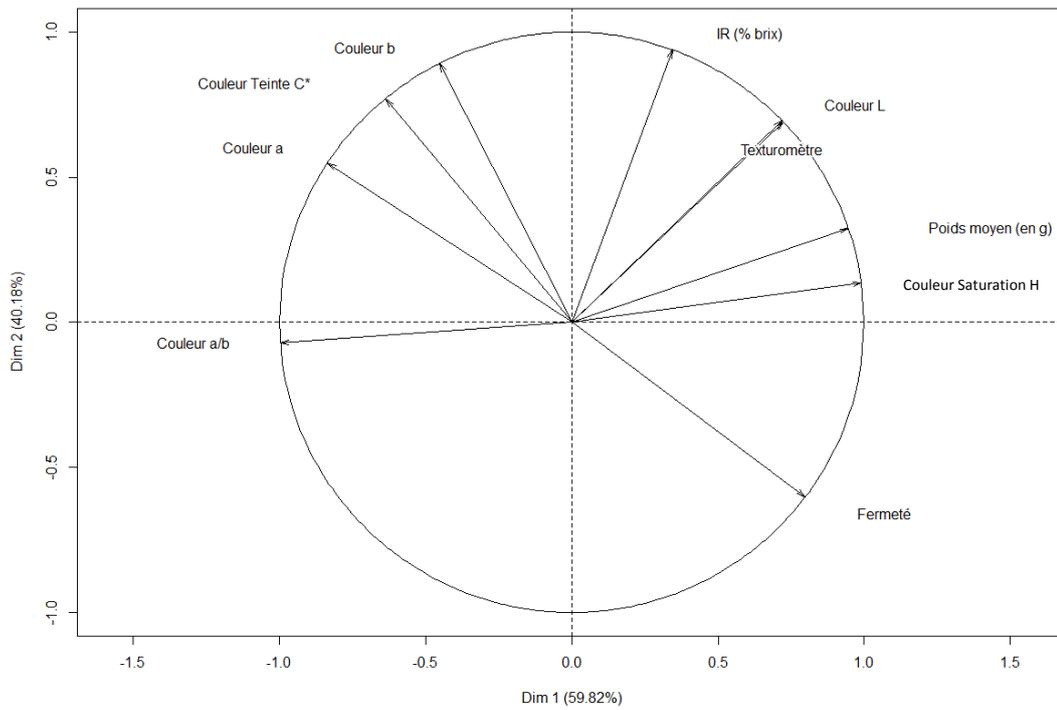


Figure 23: Cercle de corrélation des variables.

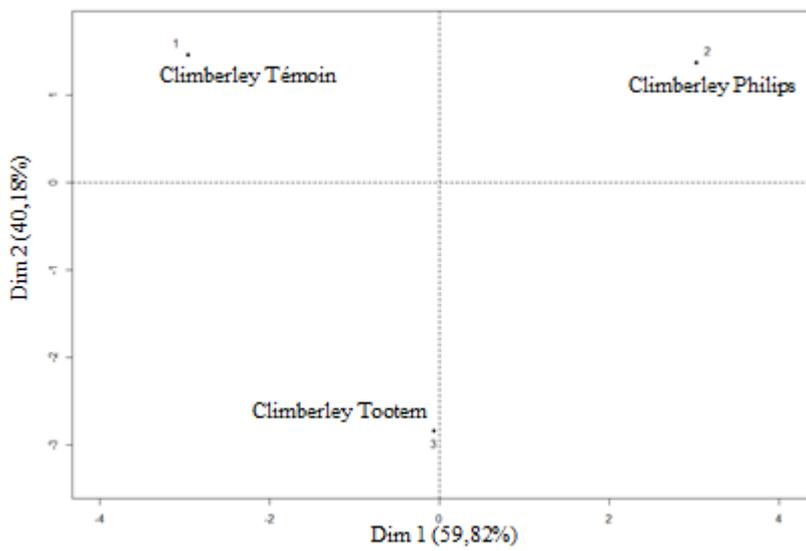


Figure 24: Carte factorielle des individus

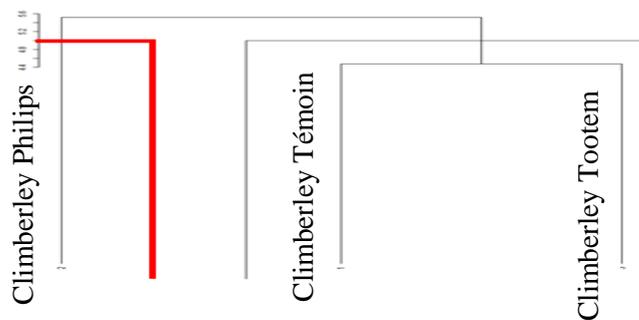


Figure 25: Classification hiérarchique et regroupement

Les résultats de l'ACP montrent que la plupart des variables sont corrélée avec le 1^{er} axe et surtout les variables poids moyen, couleur saturation H et couleur a/b. Le 2^{ème} axe est plutôt corrélé avec la variable IR (taux de sucre) (Figure 23). La matrice de corrélation des variables entre elles et le cercle de corrélation montrent que les variables « texture » du fruit et « IR » sont les plus corrélés positivement et ne sont pas corrélés avec la variable « fermeté ». La classification hiérarchique montre un regroupement selon les variétés étudiées. Climberley témoin et Climberley Tootem forment le 1^{er} cluster alors que Climberley Philips forme de 2eme cluster (Figure 24 et 25).

1. Développement des plantes

La croissance, la morphogenèse et le développement des plantes sont régulés par des facteurs génétiques et environnementaux. L'éclairage fournit l'énergie nécessaire pour les activités physiologiques des plantes et joue aussi un rôle très important dans leur développement.

Les mesures de longueurs des plantes n'ont pas montré une différence significative de la croissance cumulée entre le témoin et les deux traitements, même si les plantes éclairées par les LED de spectres rouges et bleus étaient plus courtes que le témoin non éclairé de 1.15%. Des études menées au Japon ont montré que la longueur de la tige de tomate a diminué de 1.6% comparée au témoin non éclairé (Jiang *et al.*, 2017). D'autre part, les réductions peuvent être plus importants sur d'autres cultures et atteindre 34% dans des cultures sous serre éclairées avec 80% de lumière rouge et 20% de lumière bleue appliqué 10h par jour sur *Euphorbia pulcherrima* (Demotes-Mainard *et al.*, 2016).

Les mesures du spectrophotomètre montrent que le système d'éclairage de la société Philips avait un R : FR de 1.7 alors que le système d'éclairage de la société Tootem avait un R : FR de 1.4. Un faible rapport R : FR peut promouvoir l'élongation de la tige surtout pour les espèces dicotylédones et ornementales. Cette élongation de tige correspond à des entre-nœuds de plus en plus importants. En plus, la sensibilité de l'élongation de la tige due à un faible R : FR semble être plus importante au cours de la journée qu'en fin de journée et selon les espèces (Demotes-Mainard *et al.*, 2016).

Dans notre étude, même si la différence de longueur n'était pas significative, les spectres bleu et rouge de la société Philips (R : FR = 1.7) ont induit des plantes plus courts que les spectres blanc et rouge de la société Tootem (R : FR = 1.4).

L'élongation hebdomadaire, le diamètre de tige et la charge en fruits étaient sensiblement les mêmes. En plus, l'évolution des courbes était la même au cours de la saison. Une diminution progressive de l'élongation et du diamètre de tige a été observée un mois après la date de plantation. Par contre, une augmentation en charge en fruits a été observée un mois après la date de plantation pour arriver à un plateau pendant la période hivernale. D'autres études ont montré que le diamètre de la tige n'était pas influencé par un spectre de lumière entre 400 et 700 nm (Pepin *et al.*, 2014).

De même, les stades de floraison et de récolte étaient sensiblement les mêmes. Au cours de la saison, une légère diminution de la vitesse de floraison et de décharge est observée ce qui est normal pour les cultures de saisons d'hivers. D'autres études ont montré qu'une floraison accélérée est observée chez plusieurs plantes soumises à de faibles rapports R : FR. Par contre, la floraison de certaines espèces reste peu sensible en réponse à un changement du rapport R : FR (Demotes-Mainard *et al.*, 2016).

De plus, les indices de surface foliaire (LAI) étaient sensiblement les mêmes entre la semaine 7 et la semaine 10 avec une légère augmentation. Un bon équilibre végétatif génératif chez les plantes a été observé puisque les valeurs de LAI étaient entre 3.8 et 4 sachant qu'une LAI de 4 est la valeur optimale (Heuvelink, 2005). Des résultats similaires ont été obtenus sur des plantes de tomates (*Lycopersicon esculentum*) et de concombre (*Cucumis sativus*) cultivés sous serre avec trois types d'éclairage d'appoint fournis par des lampes HPS, des lampes LED avec 15% de spectre bleu et 85% de spectre rouge et des lampes LED avec 15% de spectre bleu et 85% de spectres rouge et rouge lointain. Il n'y avait aucune différence significative pour la surface foliaire ou pour l'activité photosynthétique par unité de surface foliaire (Demotes-Mainard *et al.*, 2016).

D'autres chercheurs ont montré qu'un éclairage LED d'appoint ayant des spectres de lumière entre 400 et 700 nm et un PFD de 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ installé dans la canopée des plantes de tomates n'avait aucun effet significatif sur la longueur des feuilles et le nombre de feuilles comparé au témoin non éclairé (Pepin *et al.*, 2014).

Un DPV compris entre 0.6 et 1 KPa représente une zone de confort pour les plantes. Si les valeurs de DPV sont au-dessous de cet intervalle, l'activité transpiratoire sera faible, en plus, ceci peut influencer négativement l'absorption des éléments nutritifs comme le calcium, la croissance des plantes, le rendement et la qualité des fruits. Par suite, des symptômes de nécrose apicale dû à une carence en calcium peuvent être observés. D'autre part, si les valeurs de DPV sont au-dessus de cet intervalle, une forte activité transpiratoire peut conduire à un début de stress et à la fermeture des stomates, alors le rendement et la qualité des fruits peuvent être aussi réduits (Iraqi *et al.*, 1997). Dans notre étude, et pendant la journée sombre, les deux systèmes d'éclairage n'étaient pas capables d'augmenter suffisamment le DPV à des valeurs au-dessus de 0.6 KPa.

2. Qualités physico-chimiques des fruits

Le taux de fermeté des deux types d'éclairage et du témoin ont augmenté au cours de la saison, ces taux étaient toujours variables et à partir du mois d'avril, lorsque le rayonnement solaire est devenu de plus en plus important ($>25\text{mol}/\text{jour}$), il n'y avait plus d'effets de l'éclairage sur la fermeté des fruits. Après 7 jours de conservation, bien que le témoin non éclairé eût la réduction la plus importante en taux de fermeté (9.41%) comparé aux traitements éclairés, les différences n'étaient toujours pas significatives. D'autres expérimentations ont montré que la fermeté des fruits n'a pas changé significativement entre les traitements éclairés par les LED et le témoin ; ils ont considéré que cette variable est déterminée généralement par la dégradation des pectines et celluloses dans le fruit et n'est pas beaucoup influencée par les facteurs environnementaux (Jiang *et al.*, 2017). Au cours de la saison, il y a eu une légère augmentation en taux de sucres et de matière sèche pour les deux traitements et le témoin. Les fruits éclairés par les spectres blancs et rouges de la société Tootem eurent toujours les taux les plus élevés.

Des expérimentations faites sur les tomates éclairés artificiellement pendant plusieurs saisons de culture ont montré que le degré de Brix et l'acidité des fruits étaient aussi variables (Dzakovich *et al.*, 2015). De manière similaire, un éclairage artificiel ayant des spectres rouge et blanc et une PPF de 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ajouté dans le feuillage des plantes de tomate a entraîné une augmentation plus importante des teneurs en solides solubles dans les fruits (11.4% en plus) et une augmentation considérée du taux de croissance des fruits et des rendements frais (13.6%) et secs (11.8%) (Jiang *et al.*, 2017). Dans notre étude, les mesures de texture des fruits montrent une légère augmentation entre les mesures faites en février et celles d'avril. Pour les mesures de février, les spectres bleu et rouge avaient des fruits avec une texture plus importante que les fruits éclairés par des spectres de lumière blanche et rouge ou le témoin non éclairé. Cependant, il n'y avait pas de différence significative pour la texture des deux modalités d'éclairage et du témoin en avril. Les mesures du taux de fermeté faites à la même période ont montré des résultats similaires. Alors, l'effet de l'éclairage d'appoint sur les qualités des fruits devient de moins en moins remarqué quand le rayonnement solaire devient plus important.

3. Production

L'éclairage d'appoint n'a pas augmenté les rendements d'une façon significative bien que les rendements du traitement éclairé par les spectres bleus et rouges étaient supérieurs à ceux du traitement éclairé par les spectres blancs et rouges et le témoin. La courbe de la figure 20 (dans la partie résultats) illustrant l'évolution du rendement total commercialisable montre des rendements plus élevés pour le témoin au début de la saison et ceci peut être expliqué par le fait que le feuillage du témoin était moins dense que les deux autres traitements éclairés au début de la saison, alors pendant cette période, les plantes du témoin avaient un équilibre végétatif génératif plus important que les traitements éclairés.

Le poids moyen des fruits commercialisables était significativement supérieur chez les fruits éclairés par les spectres de lumière bleue et rouge et ceci a été aussi relevé par le panel de dégustateurs. Des études ont montré que le nombre de fruits de tomates par plante n'était pas affecté par l'éclairage artificiel d'appoint LED mais les fruits éclairés par les lampes LED avaient un poids moyen (181 g) significativement plus grand que le témoin (161 g) non éclairé (Pepin *et al.*, 2014). Concernant la coloration des fruits, l'éclairage d'appoint n'a pas influencé le nombre de fruits verts récoltés de la variété Climberley contrairement aux effets positifs mesurés sur la variété cerise (DR 0607 TC). Cette dernière a un nombre de fruits par grappe élevé (jusqu'à 14) alors que la variété Climberley était récoltée avec des grappes à 5 ou 6 fruits. D'autre part, les variétés de tomate cerise (deux récoltes par semaine) ont une vitesse de maturation plus élevée que les variétés grappe (une récolte par semaine). Alors l'éclairage d'appoint peut être plus utile chez les variétés ayant un nombre de fruits/grappe élevé pour aider les fruits à arriver à des stades de maturité plus homogènes et réduire les déchets de fruits verts.

Pour une culture longue, le rendement total est déterminé par l'équilibre entre la croissance végétative et générative, et par la répartition des assimilats. La quantité d'assimilats disponible pour les organes de la plante et leurs potentiels de compétition entre les organes puits sont influencées par l'intensité lumineuse reçue. Chez les tomates, les assimilats disponibles sont généralement inférieurs à celles demandées au cours de la saison par les organes puits, donc il y aura une compétition entre les organes qui peut également dépendre des variétés. Ceci peut par conséquent influencer les rendements de tomate, surtout que les cultures sont exposées au rayonnement solaire qui n'est pas stable au cours de la saison. Des expérimentations menées sur le concombre ont montré que la photosynthèse a diminué lorsqu'il y avait plus de fruits sur la plante, alors, un équilibre végétatif génératif doit être maintenu en ajustant la surface foliaire et la charge en fruits (Dorais, 2003).

4. Bilan économique

Concernant la consommation électrique des deux systèmes d'éclairage, celle de la société Tootem a été inférieure de 36.1% à celle de la société Philips. L'efficacité énergétique du système Tootem était supérieure à celle du système Philips de 22.6%. Les coûts de consommation électrique de l'éclairage et les coûts d'installation de ce système restent toujours très importants et ne peuvent pas être amortis par les augmentations du rendement pour la variété étudiée. Pour une production de tomate, une utilisation d'une autre variété pourrait être plus rentable.

5. Analyse sensorielle

Pour la variété Climberley, les résultats de l'analyse sensorielle montrent qu'il existe juste des différences significatives pour le critère de la taille. Les résultats des panels sensoriels ont révélés que pour les fruits de tomates ayant reçu un éclairage d'appoint ou non, même si les qualités physico-chimiques (sucre, acide, couleur, pH, arôme et texture) des fruits sont statistiquement différentes, cette différence n'était pas perceptible pour les dégustateurs (Dzakovich *et al.*, 2015).

Pendant notre étude, les lampes LED ont fonctionné pour 18h/j. La décision de la photopériode était basée sur les données de la DLI moyenne des 10 dernières années (Annexe I). Cependant, la saison 2018 – 2019 avait des valeurs de DLI qui étaient supérieures aux valeurs moyennes des 10 dernières années. Ceci a augmenté la consommation électrique des deux systèmes d'éclairage comparé aux études des années précédentes. D'autres chercheurs ont démontré qu'une modification de la photopériode pourrait être avantageuse pour les cultures. Une augmentation progressive de l'éclairage de 12h/j à 16h/j entre septembre et décembre puis une diminution de 16h/j à 12h/j entre janvier et avril est capable de maximiser la photosynthèse et réduire les risques de chloroses sur les feuilles de tomates (Dorais *et al.*, n.d.).

Bien que les recherches récentes indiquent que le développement des plantes dans les environnements contrôlés peut être affecté par la qualité de l'éclairage artificiel, la sensibilité des plantes cultivés dans les serres est plus complexe ce qui est dû au changement permanent de l'intensité et de la distribution de l'éclairage naturel et son lien avec l'éclairage artificiel (Gómez and Mitchell, 2016). En plus, l'efficacité de l'éclairage d'appoint diminue avec l'augmentation du flux de photons photosynthétiques naturel (PPF), mais augmente lorsque la concentration en CO₂ est plus importante (Dorais, 2003). La modification de la température peut aussi influencer l'efficacité de l'éclairage photosynthétique et la production des tomates (Dorais *et al.*, n.d.).

IV- CONCLUSION

Plusieurs études ont démontré les avantages de l'éclairage d'appoint avec des lampes LED sur les cultures mais ils en existent beaucoup moins sur leurs effets dans des conditions de culture sous serre où l'éclairage naturel fournit la majorité de la lumière utilisée par les plantes (Mitchell *et al.*, 2012). Il a été reporté que la photosynthèse était plus élevée chez les plantes ayant reçu un éclairage d'appoint par des lampes LED que par des lampes HPS (Dueck *et al.*, 2012) et que cet effet avait engendré plusieurs résultats positifs sur la morphologie des plantes, le rendement et la qualité des fruits tout en restant économiquement rentable.

Notre étude a démontré que les effets de l'éclairage d'appoint dépendent largement des variétés de tomates et de leurs propres caractéristiques. Pour la variété Climberley, le développement des plantes n'était pas affecté par l'éclairage d'appoint. Les stades de floraison et de récolte, la croissance, le diamètre de tige et la LAI étaient sensiblement les mêmes pour les deux systèmes d'éclairage et le témoin.

La qualité physico-chimique des fruits était variable. Les taux de fermeté, de matière sèche, de sucre et la texture des fruits ont changé au cours de la saison. Seuls les spectres blanc et rouge de la société Tootem avaient les taux de sucre et de matière sèche les plus importants tout le long de la saison.

Les deux systèmes d'éclairage n'étaient pas capables d'augmenter significativement les rendements de la variété Climberley alors que cela a été observé sur les variétés cerise. D'autre part, les spectres bleu et rouge de la société Philips ont augmenté significativement le poids moyen des fruits.

L'efficacité énergétique du système Tootem était plus importante que celle de Philips de 22.6%. Dans les deux cas, les coûts de consommation électrique et d'investissement sont très élevés et n'étaient pas amortis par l'augmentation du rendement de Climberley.

Le panel sensoriel a perçu des différences significatives seulement au niveau de la taille des fruits de Climberley. Cependant, pour la variété Brioso, les fruits éclairés par Philips sont perçus plus grandes, plus côtelées et plus acide que Tootem. A l'inverse, les fruits éclairés par Tootem sont perçus plus sucrés que Philips.

La sensibilité des plantes à l'éclairage d'appoint dans des conditions de culture au Sud de la France est largement influencée par l'éclairage naturel. De même, l'efficacité des LEDs a diminué avec l'augmentation de la DLI de la saison 2018-2019, particulièrement lumineuse, comparée à la moyenne des 10 dernières années. Finalement, les LEDs possèdent des propriétés électriques, physiques et opérationnelles qui n'existent pas chez les systèmes conventionnels mais des recherches plus approfondies seront essentielles pour optimiser les spectres et les intensités d'éclairage nécessaires pour répondre aux besoins des plantes selon leurs différents stades de développement et conditions de culture.

V- PERSPECTIVES

La consommation électrique des LEDs, même si elle est considérée inférieure aux systèmes d'éclairage HPS, représente dans le cas de spectres bleu et rouge de la société Philips environ 30% de la consommation totale électrique dans une serre semi fermée. Ceci peut limiter l'utilisation de ces systèmes avec l'augmentation possible des prix d'électricité pour les années suivantes.

L'utilisation des systèmes d'éclairage d'appoint peut être plus faisable dans le cas des fruits de petits calibres et haute valeur et leurs effets sur les cultures peuvent être plus marqués dans les régions de production nordiques qui sont en vrai déficit d'éclairage naturel.

Les systèmes de gestion dynamiques contrôlant la quantité et la qualité d'éclairage et la photopériode en modifiant les spectres lumineux pour s'adapter aux besoins des plantes peuvent limiter les consommations énergétiques et favoriser les meilleures conditions pour le développement des plantes. Une bonne gestion de la photopériode est très importante parce qu'elle permet d'éviter l'utilisation supplémentaire de l'éclairage LED aux moments où il ne l'est pas nécessaire.

Des études sont menées pour évaluer l'effet des différents spectres lumineux sur le control des maladies et ravageurs, ceci peut réduire l'utilisation des produits phytosanitaires d'une manière significative. Sur d'autres cultures, l'éclairage d'appoint LED est plus avantageux comme pour les plantes ornementales où la gestion de la forme et la taille des plantes est beaucoup plus importante, de même pour la production de plantules ou de salades ayant un cycle de production rapide et densité de plantation élevée.

De plus, la composition des fruits en sucres, acides, vitamines et métabolites secondaires est largement influencée par l'éclairage. Alors l'utilisation de l'éclairage d'appoint peut être avantageux pour l'amélioration de la qualité des fruits.

Les résultats d'expérimentations sous conditions contrôlés ne sont pas nécessairement appliqués aux conditions de cultures sous serre. Pour arriver à une production plus rentable et durable, l'éclairage des cultures doit être intégré et optimisé dans l'ensemble du système horticole.

Enfin, d'autres recherches doivent être menées pour mieux comprendre les effets des lampes LED avec leurs spectres variés sur les cultures.

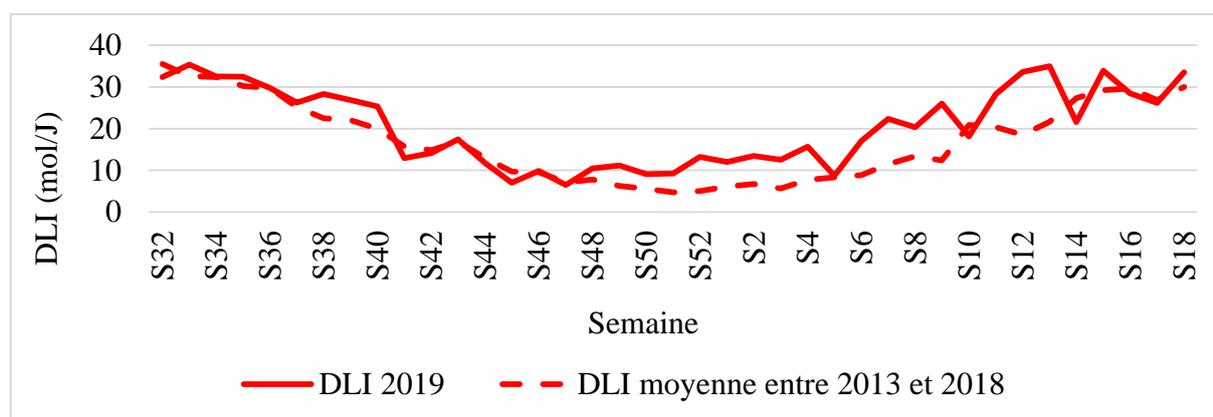
VII- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abidi, F.** (2013) *Effets de la qualité de la lumière sur l'élaboration de l'architecture du rosier buisson*. Université d'Angers.
- Avelin, C.** (2018) La tomate en 2017 : bilan de campagne.
- Ballaré, C.L.** (2014) Light Regulation of Plant Defense. *Annu. Rev. Plant Biol.*, **65**, 335–363.
- Bourget, C.M.** (2008) An Introduction to Light-emitting Diodes. *HortScience*, **43**, 1944–1946.
- Chang, C.L., Chang, K.P. and Song, G.B.** (2016) Design and Implementation of a Cloud-Based LED Lighting Control System for Protected Horticulture. *Appl. Eng. Agric.*, **32**, 697–706.
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., et al.** (2016) Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot.*, **121**, 4–21.
- Deram, P., Lefsrud, M.G. and Orsat, V.** (2014) Supplemental Lighting Orientation and Red-to-blue Ratio of Light-emitting Diodes for Greenhouse Tomato Production. *HortScience*, **49**, 448–452.
- Dorais, M.** (2003) The use of supplemental lighting for vegetable crop production: Light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. In Canada, pp. 1–8.
- Dorais, M., Ménard, C. and Gosselin, A.** *Effets d'un éclairage photosynthétique, une électro-technologie québécoise sur la culture de la tomate et de la laitue de serre*, Université Laval.
- Dueck, T.A., Janse, J., Eveleens, B.A., Kempkes, F.L.K. and Marcelis, L.F.M.** (2012) Growth of tomatoes under LED and HPS lighting. *Acta Hortic.*, 335–342.
- Dzakovich, M.P., Gómez, C. and Mitchell, C.A.** (2015) Tomatoes Grown with Light-emitting Diodes or High-pressure Sodium Supplemental Lights have Similar Fruit-quality Attributes. *HortScience*, **50**, 1498–1502.
- Faust, J.** (2015) *Light Management in Greenhouses*, Spectrum Technologies, Inc. Available at: <http://www.specmeters.com/assets/1/7/A051.pdf> [Accessed February 1, 2019].
- Gislerød, H.R., Mortensen, L.M., Torre, S., Pettersen, H., Dueck, T. and Sand, A.** (2012) Light and energy saving in modern greenhouse production. *Acta Hortic.*, 85–97.
- Gómez, C. and Mitchell, C.A.** (2016) In search of an optimized supplemental lighting spectrum for greenhouse tomato production with intracanopy lighting. *Acta Hortic.*, 57–62.
- Gómez, C., Morrow, R.C., Bourget, C.M., Massa, G.D. and Mitchell, C.A.** (2013) Comparison of Intracanopy Light-emitting Diode Towers and Overhead High-pressure Sodium Lamps for Supplemental Lighting of Greenhouse-grown Tomatoes. *HortTechnology*, 93–98.
- Hee-Sun Kook, K.K.** (2013) The Effect of Blue-light-emitting Diodes on Antioxidant Properties and Resistance to *Botrytis cinerea* in Tomato. *J. Plant Pathol. Microbiol.*, **04**. Available at: <https://www.omicsonline.org/the-effect-of-bluelightemitting-diodes-on-antioxidant-properties-and-resistance-to-botrytis-cinerea-in-tomato-2157-7471.1000203.php?aid=19098> [Accessed May 21, 2019].

- Hemming, S.** (2011) Use of natural and artificial light in Horticulture-Interaction of plant and technology. *Acta Hortic.*, 25–35.
- Heuvelink, E.** (2005) *Tomatoes*, Wallingford: CABI Pub. Available at: <http://dx.doi.org/10.1079/9780851993966.0000> [Accessed May 22, 2019].
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Hogendonk, L., Janse, J., Kaarsemaker, R. and Maaswinkel, R.** (2006) Horticultural lighting in the Netherlands: new developments. *Acta Hortic.*, 25–34.
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., Ieperen, W. van and Harbinson, J.** (2010) Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J. Exp. Bot.*, **61**, 3107–3117.
- Huché-Thélier, L., Crespel, L., Gourriec, J.L., Morel, P., Sakr, S. and Leduc, N.** (2015) Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot.*, **121**, 22–38.
- Iraqi, D., Gauthier, L., Dorais, M. and Gosselin, A.** (1997) Influence du déficit de pression de vapeur et de la photopériode sur la croissance, la productivité et la composition minérale de la tomate de serre. *Can. J. Plant Sci.*, **77**, 267–272.
- Jarvis, P.G. ed.** (1981) *Stomatal physiology*, Cambridge: Univ. Pr.
- Jiang, C., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ebihara, M., Nakaminami, A. and Maruo, T.** (2017) Photosynthesis, plant growth, and fruit production of single-truss tomato improves with supplemental lighting provided from underneath or within the inner canopy. *Sci. Hortic.*, **222**, 221–229.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T. and Shinohara, Y.** (2012) Effects of Supplemental Lighting with Light-Emitting Diodes (LEDs) on Tomato Yield and Quality of Single-Truss Tomato Plants Grown at High Planting Density. *Environ. Control Biol.*, **50**, 63–74.
- Marshall, B. ed.** (2000) *Leaf development and canopy growth*, Sheffield: Sheffield Academic Press [u.a.].
- Massa, G.D., Kim, H.-H., Wheeler, R.M. and Mitchell, C.A.** (2008) Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience*, **43**, 1951–1956.
- Ménard, C., Dorais, M., Hovi, T. and Gosselin, A.** (2006) Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Hortic.*, 291–296.
- Mitchell, C.A., Both, A.-J., Bourget, C.M., Burr, J.F., Kubota, C., Lopez, R.G., Morrow, R.C. and Runkle, E.S.** (2012) LEDs: The Future of Greenhouse Lighting! , 9.
- Morgan, D.L.** (2013) Daily Light Integral (DLI) and greenhouse tomato production. , 3.
- Morrow, R.C.** (2008) LED Lighting in Horticulture. , **43**, 4.
- Mottus, M., Sulev, M., Baret, F. and Lopez-Lorenzo, R.** (2012) *Encyclopedia of sustainability science and technology* R. A. Meyers, ed., New York: Springer.

- Nájera, C., Guil-Guerrero, J.L., Enríquez, L.J., Álvaro, J.E. and Urrestarazu, M.** (2018) LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. *Postharvest Biol. Technol.*, **145**, 151–156.
- Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S. and Goto, E.** (2012) Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Hortic.*, 261–266.
- Olle, M. and Viršile, A.** (2013) The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agric. Food Sci.*, **22**, 223–234.
- Pepin, S., Fortier, E., Béchard-Dubé, S.A., Dorais, M., Ménard, C. and Bacon, R.** (2014) Beneficial effects of using a 3-D LED interlighting system for organic greenhouse tomato grown in Canada under low natural light conditions. *Acta Hortic.*, 239–246.
- Prenger, J.J. and Ling, P.P.** (2001) Greenhouse Condensation Control. , 4.
- Riga, P., Anza, M. and Garbisu, C.** (2008) Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *J. Sci. Food Agric.*, **88**, 158–166.
- Sédillot, B.** (2018) La campagne 2018 de la tomate fraîche cumule production en repli et prix en berne. *Agreste Conjonct.*, 4.
- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M. and Roth, B.** (2015) LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **49**, 139–147.
- Spampinato, J.** (2014) Light Emitting Diodes for Indoor Growing Operations: A comparison of traditional lighting and LEDs. , 13.
- Stapel, O.** (2015) L'éclairage LED sur mesure dans les productions végétales de demain. *Innov. Agron.*, **45**, 119–124.
- Torres, A.P., Lopez, R., Horticulture, P. and Architecture, L.** (2012) Measuring Daily Light Integral in a Greenhouse. , 7.
- Urrestarazu, M., Nájera, C. and Gea, M. del M.** (2016) Effect of the Spectral Quality and Intensity of Light-emitting Diodes on Several Horticultural Crops. *HortScience*, **51**, 268–271.

VIII- ANNEXES



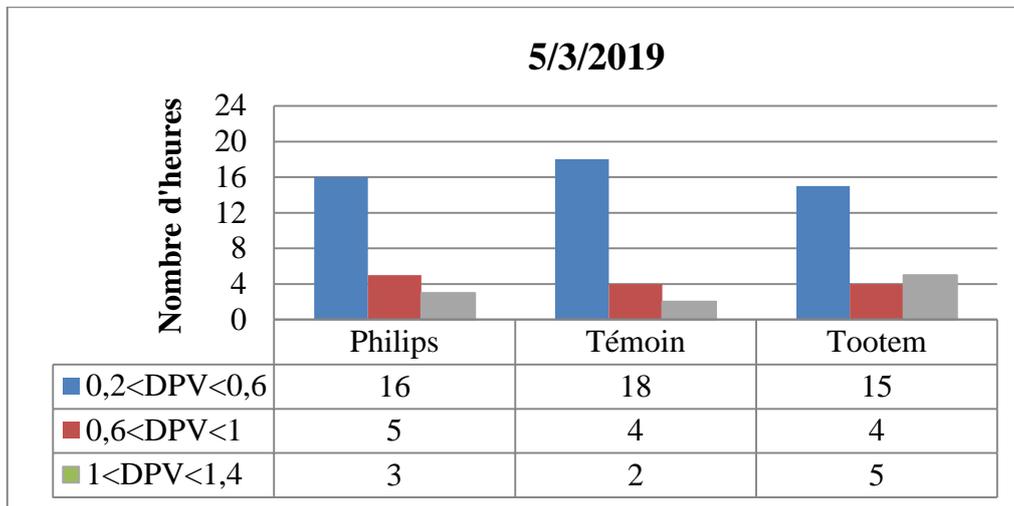
Annexe I: DLI journalière entre août et avril.

Annexe II: Tableau représentatif des principales caractéristiques des systèmes d'éclairage Philips, Tootem (blanc et rouge), Tootem (blanc) et l'éclairage naturel à l'intérieur et à l'extérieur de la serre avec des mesures prises à une distance de 20 cm des lampes à l'aide d'un spectrophotomètre (marque Gigahertz optik).

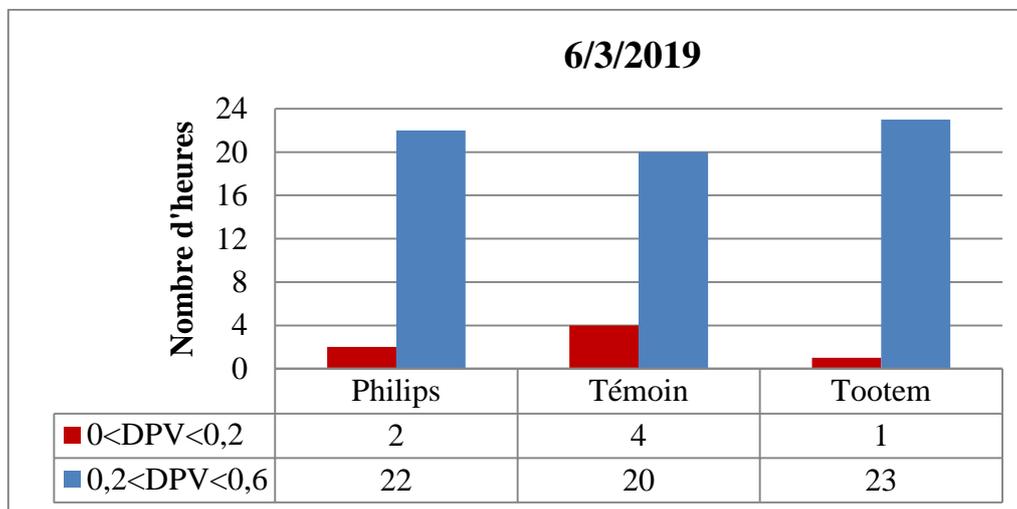
	LED			Eclairage naturel hors serre	Eclairage naturel dans la serre
	Phillips	Tootem Bl+R	Tootem Bl		
Integral sensor value (lux)	850,7	1268,8	1222,1	62194,3	32606,3
PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	73,9	17,4	16,2	1128,5	575,1
R/FR	1,7	1,4	1,3	0,7	0,7
Peak wavelength (nm)	660,9	630,9	594,6	531,7	528,7
Radiometric intensity (W/m^2)	14,2	3,8	3,5	344,2	171,4
DLI ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{Jour}$)	4.79	1,1	1.05	32.50	16,6

Annexe III: Tableau représentatif des mesures prises à l'aide d'un spectrophotomètre (marque Gigahertz optik) sur trois niveaux de la plante: bas, milieu et haut avec les principales caractéristiques des systèmes d'éclairage Philips, Tootem (blanc et rouge) et Tootem (blanc).

	Philips			Tootem Bl+R			Tootem Bl		
	Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
Integral sensor value (lux)	7,22	902,32	8,69	64,57	1342,60	31,65	61,72	1223,50	21,97
PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	0,61	78,10	0,77	0,83	18,33	0,40	0,77	16,13	0,26
R/FR	1,59	1,70	1,60	1,19	1,37	1,11	1,16	1,32	0,95
Peak wavelength (nm)	660,6	660,8	660,8	631,6	631,2	628,4	598	592	585,9
Radiometric intensity (W/m^2)	0,12	14,92	0,15	0,19	3,97	0,09	0,18	3,53	0,07
DLI ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{Jour}$)	0.04	5.06	0.05	0.05	1.19	0.03	0.05	1.04	0.02



Annexe IV: Nombre d'heure en fonction du DPV (Vapour Pressure Deficit) le 5/3/2019



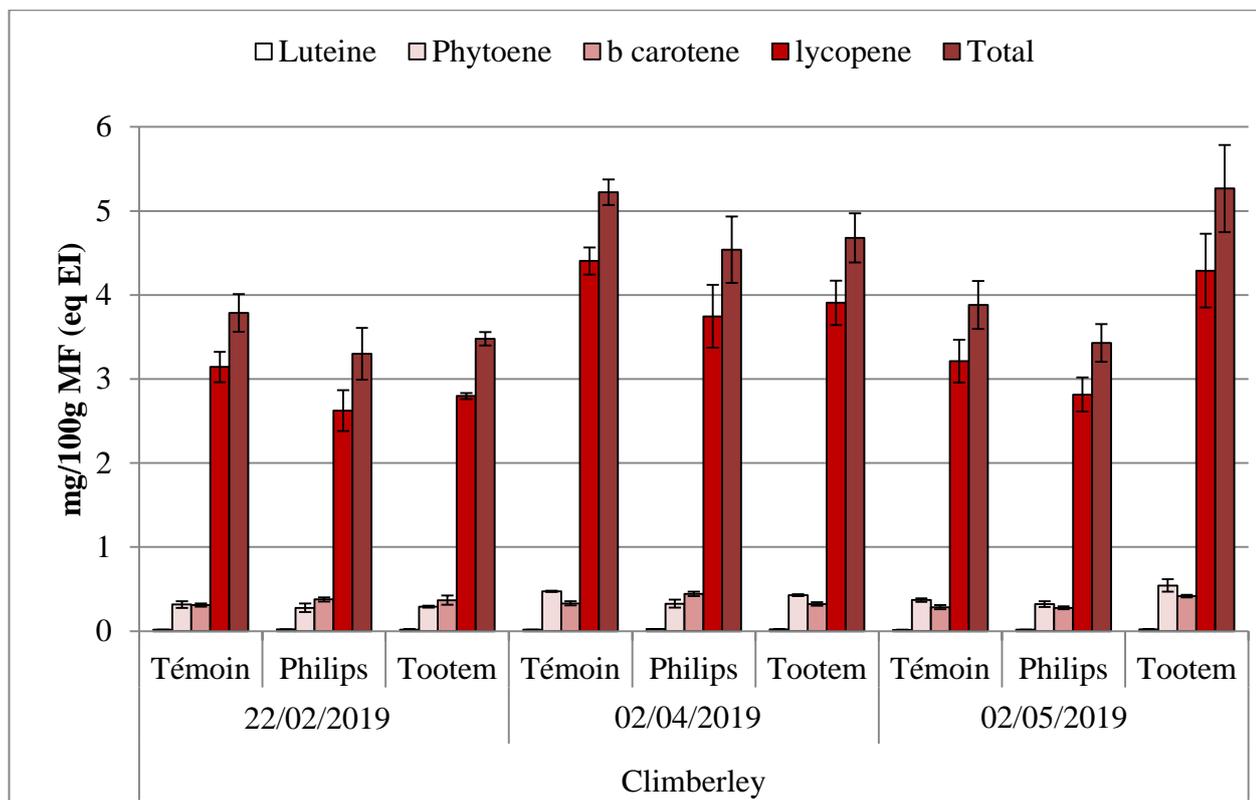
Annexe V: Nombre d'heure en fonction du DPV (Vapour Pressure Deficit) le 6/3/2019



Annexe VI: Eclairage de la société Tootem dans le feuillage de la culture de tomate (source personnelle).



Annexe VII: Eclairage de la société Philips dans le feuillage de la culture de tomate (source personnelle).



Annexe VIII: Concentration en caroténoïdes des différents systèmes d'éclairage.

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



UNIVERSITÉ DE NANTES

Année universitaire : 2018-2019

Spécialité : Biologie Végétale

Spécialisation (et option éventuelle) :

Filières de l'horticulture et innovation (FHI)

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Utilisation d'éclairage photosynthétique LED en cultures de tomate hors sol chauffées

Par : Diana NACOUZI



Soutenu à Angers le 11 juin 2019

Devant le jury composé de :

Président : Didier PELTIER

Maître de stage : Raphaël TISIOT

Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU

Autres membres du jury

Philippe SIMIER

Jérémy CLOTAULT

Emmanuel GEOFFRIAU

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>





Diplôme : Master
Spécialité : Biologie Végétale
Spécialisation / option : Filières d'Horticulture et Innovation
Enseignant référent : Etienne CHANTOISEAU

Auteur(s) : Diana NACOUZI

Date de naissance* : 27 août 1993

Nb pages : 31 Annexe(s) : 5

Année de soutenance : 2019

Organisme d'accueil : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes (CTIFL)

Adresse : 751 Le Balandran, 30127 Bellegarde

Maître de stage : Raphaël TISIOT

Titre français : Utilisation d'éclairage photosynthétique LED en cultures de tomate hors sol chauffées.

Titre anglais: The use of LED photosynthetic lighting in heated hydroponic tomato crops.

Résumé:

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est l'un des légumes les plus cultivés et consommés dans le monde. Ce fruit est riche en vitamines et antioxydants d'où sa valeur nutritive très élevée. L'éclairage est l'un des facteurs abiotiques les plus importants influençant les cultures ainsi que les qualités physico-chimiques des fruits. Pour une production optimale, la qualité, l'intensité, le spectre de la lumière ainsi que la photopériode doivent être adaptés selon les besoins des cultures. Le développement des systèmes d'éclairage LED (Light Emitting Diodes) est considéré comme une innovation pour les producteurs et surtout ceux qui sont dans des zones de production peu ensoleillées où l'éclairage devient un facteur limitant pour les cultures. Ces lampes ont la capacité de fournir différents spectres lumineux perçus par les photorécepteurs des plantes. L'objectif de notre étude est de déterminer l'influence d'un éclairage artificiel d'appoint réalisé durant 18h/j avec deux systèmes de lampes LED sur la variété Climberley. Le 1^{er} est celui de la société Philips avec des LEDs rouges (660 nm) et des LEDs bleues (440 nm). Le 2^{ème} est celui de la société Tootem avec des bandes de LED blanches (440 nm et 600 nm principalement) et rouges (630 nm). Notre étude a démontré que le développement des plantes n'était pas affecté par l'éclairage d'appoint. Les taux de fermeté, matière sèche, sucre et la texture des fruits ont changé au cours de la saison. Les fruits éclairés par les spectres blanc et rouge avaient les taux de sucre les plus élevés. Les deux systèmes d'éclairage n'étaient pas capables d'augmenter significativement les rendements mais les spectres bleu et rouge ont augmenté le poids moyen des fruits. La sensibilité des plantes à l'éclairage d'appoint dans des conditions de culture au Sud de la France est largement influencée par l'éclairage naturel.

Abstract :

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is one of the most widely grown and consumed vegetables across the world. This fruit is rich in vitamins and antioxidants and has a high nutritional value. Lighting is a major abiotic factor influencing the crops and the physicochemical qualities of fruits. For optimal production, the quality, intensity, spectrum of light and photoperiod must be adapted according to the needs of plants. Development of LEDs is considered an innovation for producers and especially in low-sunlight production areas where lighting becomes a limiting factor for crops. These lamps have the ability to provide different light spectrum perceived by the photoreceptors of plants. The objective of our study is to determine the influence of artificial lighting with two LED lamp systems on the Climberley variety during a photoperiod of 18h/day. The first system is that of Philips company with red LEDs (660 nm) and blue LEDs (440 nm). The 2nd system is that of Tootem company with white (440 nm and 600 nm mainly) and red (630 nm) light spectrum. Our study revealed that plant development was not affected by supplemental lighting. Firmness, dry matter, sugar content and fruit texture were variable during the season. The fruits lit by the white and red spectrum have the highest sugar levels. Neither of LED systems had significant effect on increasing tomato yield, but the blue and red spectrum has significantly increased the average fruit weight. The susceptibility of plants to supplemental artificial lighting in the south of France is largely influenced by natural lighting.

Mots-clés : Tomate (*Solanum lycopersicum*), LED (Light Emitting Diodes), photopériode, spectres lumineux, qualité des fruits.

Key Words: Tomato (*Solanum lycopersicum*), LED (Light Emitting Diodes), photoperiod, light spectrum, fruit quality.

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