



Étude de l'influence de la lumière LED sur la production de fraises et de framboises en culture hors-sol

Tiphaine Chambreuil

► To cite this version:

Tiphaine Chambreuil. Étude de l'influence de la lumière LED sur la production de fraises et de framboises en culture hors-sol. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-02969195

HAL Id: dumas-02969195

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02969195>

Submitted on 16 Oct 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.

☒ CFR Angers ☐ CFR Rennes

Année universitaire : 2019-2020 Spécialité : Horticulture Spécialisation (et option éventuelle) : Ingénierie des Productions et des Produits de l'Horticulture (I2PH)	Mémoire de fin d'études ☒ d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement ☐ de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
---	---

Etude de l'influence de la lumière LED sur la production de fraises et de framboises en culture hors-sol

Par : Tiphaine CHAMBREUIL



Soutenu à Angers le 03 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : Emmanuel GEOFFRIAU

Maître de stage : Bastien CHRIST

Enseignant référent : Mathilde BRIARD

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Jessica BERTHELOOT, ingénieure chargée de recherche à l'INRAE

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

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

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

Date et signature du tuteur de stage ⁽²⁾ :

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⁾ **Chambreuil Tiphaine**

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

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais avant toute chose adresser mes plus sincères remerciements à l'équipe de l'Agroscope de Conthey qui m'a accueillie des plus chaleureusement. Je remercie tout particulièrement Bastien Christ, mon maitre de stage qui m'a permis de réaliser mon stage et a su me guider pendant ces six derniers mois. Je le remercie pour ses conseils avisés, sa confiance et tout le temps qu'il a pu m'accorder. Mes remerciements aussi à André Ançay, Eliane Filliez et Florence Michellod ainsi que toute l'équipe « baies » et Daniel Tran qui m'ont beaucoup aidé pour les récoltes, les analyses ainsi que pour leurs enseignements tout au long du stage.

J'adresse mes sincères remerciements à Julien Héritier pour son aide dans l'élaboration de certains protocoles et sa disponibilité.

Merci également à Pascal Fuchsmann et Hélène Meng pour tout le temps qu'ils ont consacré à l'étude des composés aromatiques. Je les remercie de m'avoir accueillie au centre Agroscope de Liebefeld à Berne et de m'avoir permis une première approche des analyses aromatiques.

Mes remerciements à Mathilde Briard pour sa présence et ses conseils durant ce stage.

Merci aussi à mes colocataires Natalia Tenjo et Dalinda Bouraoui toujours présentes au quotidien pour visiter la Suisse, papoter et rigoler.

Enfin j'adresse mes plus chaleureux remerciements à ma famille, mes parents mon frère et ma sœur, à mes côtés depuis toujours et à Florent qui m'a accompagné et m'accompagne au quotidien dans mes aventures.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE.....	III
TABLE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VIII
I. Introduction	1
A. Biologie et culture de la fraise et de la framboise	1
1. Fraise.....	1
a) Origine, systématique, génétique et production mondiale	1
b) Anatomie, cycle de développement et variétés	1
c) Composition du fruit et propriétés nutritives	2
d) Systèmes de production	2
2. Framboises	3
a) Origine, systématique, génétique et production mondiale	3
b) Anatomie, cycle de développement et variétés	3
c) Composition du fruit et propriétés nutritives (incl. volatiles).....	3
d) Systèmes de production (sol/substrat, couverts (tunnels), types de plants)	4
B. État des lieux de la culture de fraises et framboises en Suisse	4
1. Surfaces, systèmes de production utilisés et commercialisation.....	4
2. Défis actuels de la filière	6
C. Eclairage artificielle en horticulture.....	6
1. Besoins en lumière des végétaux.....	6
a) Photosynthèse (incl. système de mesures avec Li-cor).....	6
b) Photomorphogenèse	7
2. Présentation des différents types d'éclairage artificiel	8
3. Impact de l'ajout de lumière artificielle sur la culture des fraises et des framboises.	8
a) Rendement.....	9
b) Impact sur le métabolisme (antioxydants, volatiles, etc).....	9
D. Enjeux et problématisation du stage.....	9
1. Présentation d'Agroscope	9
2. Origine de la démarche / problématique.....	9
3. Question de recherche et hypothèses associées	9
II. MATERIEL ET METHODE	10
A. Matériel végétal	10
1. Fraise.....	10
2. Framboise	10
B. Structure de l'essai	10
C. Eclairage	12
D. Calcul du rendement	15

E.	Analyse de la photosynthèse	15
F.	Analyse de la croissance végétative à l'aide d'un scanner 3D à spectre multiple ..	17
G.	Analyse des antioxydants.....	17
1.	Préparation de poudre de fruit.....	17
2.	Extraction	17
3.	DPPH.....	17
4.	Folin Ciocalteu	18
H.	Analyse du sucre et de l'acidité	18
I.	Analyse de la fermeté	18
J.	Analyse des composés aromatiques en GC-MS.....	18
K.	Analyse de l'impact de l'éclairage sur la présence de ravageurs dans l'essai fraise ..	19
L.	Analyses des données.....	19
III.	RESULTATS	19
A.	Fraise	19
1.	Croissance végétative, photosynthèse et rendement	19
a)	Croissance végétative	19
b)	Photosynthèse et échange gazeux au sein de la plante	20
c)	Rendement.....	21
d)	Présence de maladies et ravageurs.....	23
2.	Qualité du fruit.....	24
a)	Antioxydants	24
b)	Sucre et acidité.....	25
c)	Fermeté	26
a)	Composés aromatiques.....	26
3.	Consommation électrique.....	29
B.	Framboise.....	29
1.	Photosynthèse et rendement.....	29
a)	Rendement.....	29
b)	Photosynthèse et échange gazeux au sein de la plante	32
2.	Qualité du fruit.....	33
a)	Antioxydants	33
b)	Sucre et acidité.....	34
c)	Fermeté	35
d)	Composés aromatiques.....	35
3.	Consommation électrique.....	36
IV.	DISCUSSION	37
A.	Analyse des rendements	37
B.	Analyse de la photosynthèse	37
C.	Etude des maladies et ravageurs	38

D.	Analyse de la qualité des fruits.....	38
E.	Etude de la consommation électrique	38
V.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	39
	BIBLIOGRAPHIE.....	a
	SITOGRAFIE.....	c

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Production moyenne de fraise par an en volume entre 2010 et 2018	1
Figure 2: Production moyenne de framboises par en volume entre 2010 et 2018.....	3
Figure 3 : Répartition des surfaces de production des cultures de fraises dans les cantons suisses	5
Figure 4 : Répartition des surfaces de cultures de framboises d'automne dans les cantons suisses	5
Figure 5 : Répartition des surfaces de cultures de framboises d'été dans les cantons suisses	6
Figure 6 : Spectres d'absorption de la chlorophylle et des pigments accessoires	7
Figure 7 : Plantation de framboises sur substrat dans des pots au sol	11
Figure 8 : Plan de la serre de l'essai de framboises.....	11
Figure 9 : Plan de la serre de l'essai de fraises	12
Figure 10 : Essai d'éclairage LED sur fraises	13
Figure 11 : Fraises cultivées sous l'éclairage LED.....	13
Figure 12 : Système d'éclairage LED de l'essai sur les framboises	14
Figure 13 : Système d'éclairage LED de l'essai sur les framboises	14
Figure 14 : Spectre lumineux des lampes LED utilisées sur l'essai des fraises.....	15
Figure 15 : Spectre lumineux des lampes LED utilisées sur l'essai des framboises.....	15
Figure 16 : Variation de la photosynthèse en fonction de l'apport en CO ₂	16
Figure 17 : Variation de la photosynthèse en fonction de l'intensité lumineuse.....	16
Figure 18 : Scanner 3D PlantEyeF500 Phenospex.....	17
Figure 19. Fonctionnement de la GC-MS pour l'analyse des composés aromatiques.....	19
Figure 20 : Hauteur des plants de fraisiers au cours du temps avant fructification.....	20
Figure 21 : Surface foliaire projetée au cours du temps des plants de fraisiers	20
Figure 22 : Photosynthèse mesurée en CO ₂ absorbée par la feuille de fraisiers.....	21
Figure 23 : Evapotranspiration de la feuille de fraisiers.....	21
Figure 24 : Rendement cumulé moyen par plants de fraisiers au cours de la saison pour des fruits de premiers choix.	22
Figure 25 : Poids cumulé des fraises de second choix au cours de la saison.	22
Figure 26 : Rapport des fraises de second choix sur les fraises de premier choix au cours de la saison1.....	23
Figure 27 : Suivi du poids moyen d'une fraise de premier choix au cours de la saison.	23
Figure 28 : Nombre moyen de thrips par fleurs au cours de la saison	24
Figure 29 : Mesure de la teneur en polyphénols totaux sur des fraises du mois de mai avec le réactif de Folin Ciocalteu.	24
Figure 30 : Mesure de la teneur en composé antioxydants sur des fraises du mois de mai avec le DPPH.....	25
Figure 31 : Suivi de la teneur en sucre (teneur en saccharose) des fraises au cours de la saison.....	25
Figure 32 : Suivi de l'acidité des fraises au cours de la saison	26
Figure 33 : Fermeté des fraises au cours de la saison.....	26
Figure 34 : Teneur relative des composés marquant les plus grandes différences significatives dans les arômes des fraises de deux récoltes (mois de mai et mois de juin) ...	29
Figure 35 : Consommation électrique au cours de la saison de l'ensemble des lampes LED installées dans la serre de l'essai de fraises.	29
Figure 36 : Rendement cumulé de framboises de premier choix par cannes de framboisier au cours de la saison	30
Figure 37 : Poids cumulé en framboises de second choix par cannes de framboisier au cours de la saison	31
Figure 38 : Part des framboises de second choix par rapport aux framboises de premier choix.....	31
Figure 39 : Poids moyen d'une framboise de premier choix au cours de la saison.	32

Figure 40 : Evapotranspiration des feuilles de framboisiers.....	32
Figure 41 : Photosynthèse mesurée en absorption de CO ₂ par la feuille de framboisiers ...	33
Figure 42 : Teneur en polyphénols totaux sur des framboises du mois de mai mesurée avec le réactif de Folin	33
Figure 43 : Teneur en composés antioxydants sur des framboises du mois de mai mesuré avec du DPPH.....	34
Figure 44 : Teneur en sucre (saccharose) sur les framboises au cours de la saison	34
Figure 45 : Acidité des framboises au cours de la saison.	35
Figure 46 : Fermeté des framboises au cours de la saison.....	35
Figure 47 : Teneur relatives en composés aromatiques dans les framboises	36
Figure 48 : Consommation électrique de l'ensemble des LED pour l'essai sur framboises ..	37

LISTE DES ABREVIATIONS

°Brix : degré Brix

μ : micro

CHF : Franc Suisse

Ct : centime de franc Suisse

CTRL : contrôle

DHS-VTT : Dynamic Headspace Vacuum Transfer In-Trap Extraction

g : gramme

g. Zitro./kg : gramme d'acide citrique par kg

HM : halogénure métallique

HPS : sodium haute pression

kWh : Kilowatt heure

LED : light emitting diode

m : mètre

OFAG : Office fédéral de l'agriculture (Suisse)

s : seconde

t : tonne

I. Introduction

A. Biologie et culture de la fraise et de la framboise

1. Fraise

a) *Origine, systématique, génétique et production mondiale*

La fraise, *Fragaria x ananassa* Duch., aussi appelée fraise à gros fruits, est une espèce de la famille des Rosaceae cultivée en Europe depuis les années 1740. D'un point de vue botanique, cet hybride octoploïde est issu d'un croisement entre deux variétés originaires du continent américain *F. chiloensis* et *F. virginiana* (Hummer & Hancock, 2009) [1].

Aujourd'hui, la production de fraise est mondiale avec plus de 8 millions de tonnes de fraises produites chaque année. Les deux plus grands pays producteurs sont les Etats-Unis et la Chine qui produisent à eux-seuls plus de la moitié de la production mondiale (**Figure 1**) (FAOstats 2010-2018 [2]). La production chinoise, de loin la plus importante, ne cesse de croître d'année en année. En Europe ce sont environ 1.5 millions de tonnes qui sont produites chaque année principalement par l'Espagne, la Pologne et l'Allemagne. L'Espagne produit à elle seule un quart de la production de fraise européenne.

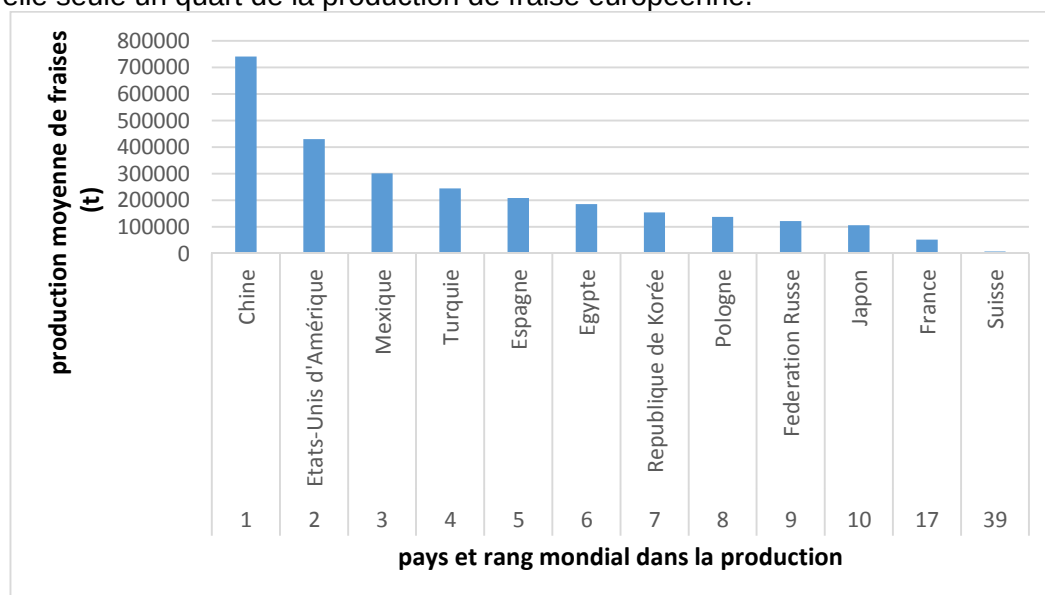


Figure 1: Production moyenne de fraise par an en volume entre 2010 et 2018 (données FAOstat 2010 à 2018 [2])

b) *Anatomie, cycle de développement et variétés*

La fraise est un fruit complexe dont la partie charnue constitue le réceptacle floral et les véritables fruits sont les akènes apparaissant sous forme de petites graines jaunes visibles à la surface. Les fraisiers sont communément multipliés de façon végétative pour la production grâce aux stolons (Hummer & Hancock, 2009). L'initiation florale est la transition d'un apex végétatif vers un apex floral. On distingue différents types de variétés suivant leur réaction à la longueur du jour pour l'initiation florale (Darnell et al., 2003). Il existe 3 groupes, des variétés non remontantes, ou variété d'été, pour lesquels l'induction florale s'effectue en automne lorsque la longueur du jour est inférieure à une longueur du jour critique (environ 13h) avec par exemple les variétés 'Ciflorette' ou 'Guariguette'. Ces variétés nécessitent d'être mises pendant un certain nombre de jours au froid (pendant l'hiver) pour que la dormance soit levée dans les bourgeons floraux (Darnell et al., 2003). Elles fructifient de façon assez précoce, l'année suivante, dès le mois de mars. Les variétés semi-remontantes, dont la longueur du jour critique est d'environ 14h30, et les variétés remontantes, dont la longueur du jour critique est d'environ 16h, peuvent théoriquement produire toute l'année en continu avec, par exemple, les variétés 'Mara des Bois', 'Charlotte' ou 'Murano' (CTIFL,

2004). Les variétés remontantes sont principalement utilisées pour étaler la récolte sur une plus longue période (SwissFruit, 2017).

c) Composition du fruit et propriétés nutritives

La fraise est un fruit apprécié des consommateurs pour sa saveur sucrée, ses qualités nutritives et ses teneurs élevées en molécules antioxydantes. En effet les nombreux acides phénoliques, flavonoïdes et autres composés phénoliques dérivés, ainsi que son importante teneur en vitamine C, sont à l'origine de ces capacités antioxydantes. D'autres composés tels que la vitamine B9, le manganèse ou son apport important en fibres contribue à placer la fraise parmi les aliments d'intérêts nutritifs reconnus (Törrönen & Määttä, 2002) (Giampieri et al., 2012) [3].

L'arôme caractéristique très fruité de la fraise provient majoritairement de sa teneur en esters (Larsen et al., 1992). Cependant, parmi les centaines de composés volatiles identifiés, les aldéhydes, alcools et composés soufrés jouent aussi un rôle dans le bouquet aromatique et de la saveur de la fraise (Larsen et al., 1992). Larsen et al. ont défini en détail les composés volatils les plus représentatifs de la fraise et mettent en avant notamment le butanoate de méthyle et d'éthyle, ainsi que de nombreux furanones. Les furanones ne sont pas présentes dans des quantités très importantes dans les fraises mais constituent un élément majeur des profils aromatiques de ce fruit (Yan et al., 2018).

d) Systèmes de production

Différents types de plants sont produits en pépinières pour la production de fraises. Les trois principaux sont les plants frigos, les plants mottés et les plants précultivés appelés « Trayplants ». Les plants frigo sont issus de stolons et mis au froid. Leur système racinaire est bien développé et ils permettent une plus grande flexibilité dans le choix de la date de plantation. Les plants mottés sont des plants issus de stolons, ils peuvent être plantés dès que le système racinaire est assez important. Enfin, les Trayplants sont cultivés en pépinière où l'induction florale a lieu. Ils sont stockés à température négative et vendus congelés aux producteurs qui peuvent ainsi échelonner leur plantation et leur période de récolte. Les Trayplants sont ainsi récoltés l'année de leur plantation car l'induction florale a déjà eu lieu en pépinière ce qui constitue un avantage sur les plants frigos et plants mottés qui sont récoltés la deuxième année après l'année de plantation (SwissFruit, 2017).

La fraise peut être cultivée au sol avec un système construit sur butte ou en hauteur avec des 'jardins suspendus'. Lors de culture en hauteur, les plants sont cultivés dans des bacs ou sacs de substrats posés sur des gouttières placées entre 1m30 et 1m50 de hauteur (SwissFruit, 2017). Ces dernières années, on observe une augmentation des productions sur substrats permettant ainsi de s'affranchir de certaines maladies du sol parfois difficile à contrôler dans un contexte de réduction des produits phytosanitaires. En effet, pour la production de fraise en Suisse, ce sont plus de 100 ha qui sont actuellement cultivés en hors-sol, soit plus de 20% de la production (voir également partie B ci-dessous). La production hors sol présente aussi d'autres avantages tels que la réduction des risques de gel, une vitesse et une facilité de cueillette, une stabilité des rendements dû à l'amélioration du débourrement ou encore une rotation des cultures plus importantes (AGROSCOPE, Ançay, A., Carlen, C., 2015). La fraise cultivée en hors-sol sous abri présente de manière générale un bon rendement de plus de 1000 gr/plants sur la saison (de la plantation en avril jusqu'en octobre pour la variété remontante Murano) (Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne, 2016). Cependant, il faut aussi considérer un investissement et un niveau technique nécessaire important au départ qui peut entraîner des risques financiers plus importants. Enfin, le suivi doit être régulier avec notamment un contrôle régulier de la fertigation.

2. Framboises

a) Origine, systématique, génétique et production mondiale

La framboise, *Rubus ideaus* L., appartient comme la fraise à la famille des Rosaceae. Originaire des régions montagneuses d'Europe occidentale et récoltée en nature depuis des siècles, cette espèce diploïde a commencée à être cultivée au XIX^{ème} siècle pour être consommée comme fruit de table. Aujourd'hui, la production de framboise est assez répandue dans le monde mais reste relativement centrée sur les pays tempérés dans les régions d'Europe, Asie et Amérique du Nord avec des productions estivales ou automnales [1] [3].

Par rapport à la fraise, la production mondiale est plus modeste avec 800 000 tonnes produites par an. L'Europe produit près de la moitié des volumes mondiaux (365 000 tonnes environ entre 2014 et 2018). On peut noter l'entrée relativement récente de la Serbie sur le marché de la framboise qui est actuellement le deuxième producteur en Europe derrière l'Espagne et juste devant la Pologne (**Figure 2**) (FUNT Richard C., HALL Harvey K., 2013) (Darnell et al., 2006).

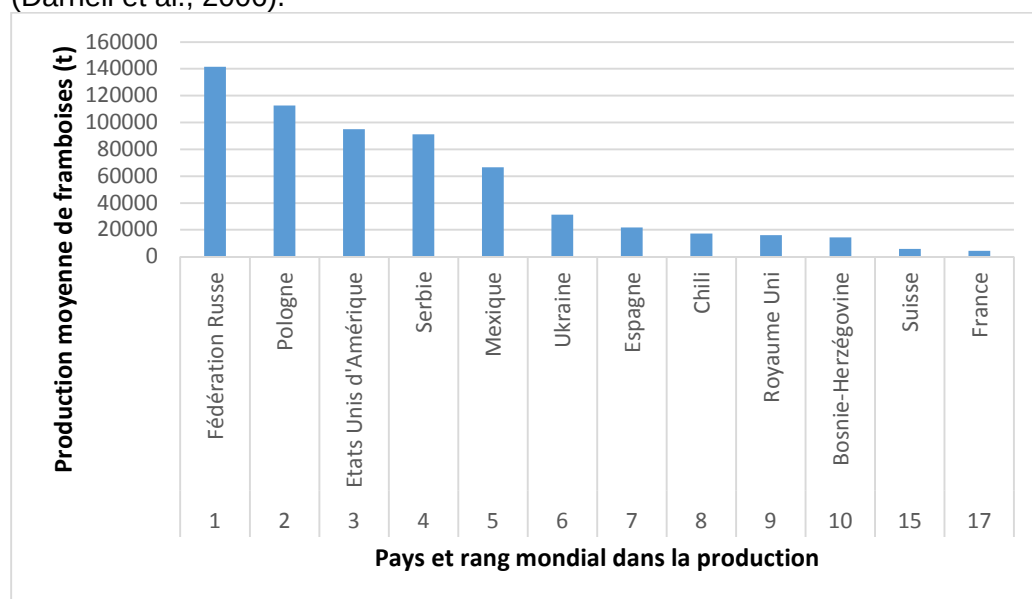


Figure 2: Production moyenne de framboises par en volume entre 2010 et 2018 (données FAOstat de 2010 à 2018 [2])

b) Anatomie, cycle de développement et variétés

La framboise est un fruit multiple constituée de plusieurs drupes (carpelle fécondé) [3]. Le framboisier, plante pérenne de la taille d'un arbrisseau, produit depuis son système racinaire des cannes ayant un cycle sur deux ans. Il existe deux types de variétés de framboisier. Pour les variétés d'été, la première année, des drageons se forment et se développent en canne. Lorsque la température baisse et la durée du jour se raccourcit en automne, les cannes induisent le développement de bourgeons floraux qui restent cependant dormant jusqu'à l'année suivante. En deuxième année, des ramilles fructifères se développent avec une floraison au mois de mai et une récolte essentiellement concentrée sur juin et juillet. Les framboisiers remontants peuvent quant à eux donner des fruits dès la première année et fructifier à nouveau la deuxième année (Aprea et al., 2015). Certaines variétés remontantes peuvent donner jusqu'à trois récoltes (SwissFruit, 2017).

c) Composition du fruit et propriétés nutritives (incl. volatiles)

Les qualités nutritionnelles de la framboise sont similaires à celles de la fraise avec notamment des teneurs importantes en composés antioxydant tels que les ellagitannins. Elle est aussi source de fibres (plus de 3g pour 100g de fruit), de vitamine C et de manganèse. De même que la fraise, elle est très peu énergétique avec des teneurs en glucides parmi les

plus faibles dans les fruits. L'arôme très caractéristique de la framboise est dû à des composés cétoniques avec notamment le 4-(4-hydroxyphenyl)butan-2-one, parfois appelé « framboise cétone » car il participe en grande partie à l'odeur caractéristique des framboises (Carew, J., et al. 2000). Elle est aussi appréciée pour ses notes sucrées et acidulées. [3]

d) *Systèmes de production (sol/substrat, couverts (tunnels), types de plants)*

La production traditionnelle de framboise s'effectue en plein champs. Des plants mottés sont alors utilisés pour être plantés essentiellement sur butte. Les plants sont cultivés sous forme de cannes qui sont palissées et peuvent s'élever jusqu'à 2m du sol. Pour la production sur substrat, les plants sont cultivés dans des pots. De la même façon que pour les fraises, les plants peuvent être précultivés pour permettre de mieux répartir temporellement la production. Les plants de framboises précultivés par les pépiniéristes et vendus en deuxième année de croissance sont appelés « Long-cane ». Les plants « Long-cane » sont vendus et stockés par les producteurs à température négative. Ceux-ci sont ensuite plantés de manière échelonnée afin d'étendre la période de production (SwissFruit, 2017).

B. État des lieux de la culture de fraises et framboises en Suisse

1. Surfaces, systèmes de production utilisés et commercialisation

En Suisse les petits fruits sont cultivés sur une surface d'environ 1000ha (fraise 56% ; framboise 16% ; myrtilles 9%) (Fruit-Union Suisse, 2020). La Suisse produit annuellement plus de 9000 tonnes de fraises et environ 3000 tonnes de framboises. (Données FAOstat 2010-2018 [2])

La Suisse ne présente pas de réel bassin de production de petits fruits ceux-ci étant produits dans de nombreux cantons. Cependant, certains cantons se distinguent notamment pour la production de fraises avec le canton de Berne qui présente en 2019 une surface de production de plus de 100 hectares suivi de près par la Thurgovie et le Schaffhouse abritant à eux deux plus de 80 hectares de production de fraise (Figure 3).

Pour la framboise, les productions étant moins importantes, on observe moins de différences de surface de production entre les cantons. La culture se fait essentiellement dans les cantons aux reliefs plus plats au nord du pays et dans les vallées des cantons du Sud aux reliefs plus montagneux telles que la vallée du Rhône dans le canton du Valais (**Figure 4** et **Figure 5**).

En Suisse, la fraise et la framboise sont très appréciées par les consommateurs. En 2017, L'office fédérale de l'agriculture, l'OFAG soulignait une nette augmentation de la consommation des petits fruits avec une consommation de framboise passée d'environ 2000 tonnes en 2010 à 4500 tonnes en 2017 (OFAG, 2017). La consommation de fraise quant à elle est d'environ 20 000 tonnes par ans. La fraise et la framboise constitue ainsi les petits fruits frais les plus consommés. Parallèlement à cette demande croissante en petits fruits, on constate une progression des surfaces cultivées. En effet, la production de fraises représente plus de 521 ha en 2020 en Suisse et la framboise plus de 170 ha. La production suisse ne suffit pas à répondre à l'ensemble de la demande mais se distingue des productions importées par leur fraîcheur dû à leur proximité.

Répartition des surfaces de production des cultures de fraises

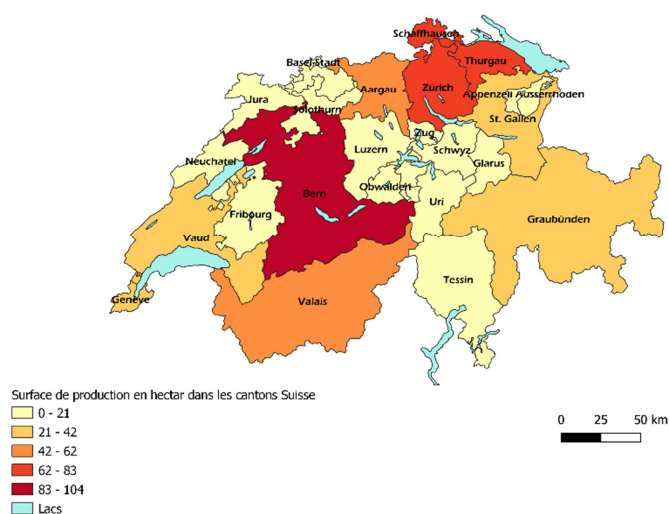


Figure 3 : Répartition des surfaces de production des cultures de fraises dans les cantons suisses: les surfaces du Vaud et de Genève, de la Thurgovie et du Schaffhouse et de l'Obwald, du Nidwald et du canton de Lucerne.(Chambreuil T. à partir des données de Fruit-Union Suisse 2020)

Répartition des surfaces de production des cultures de framboises d'automne

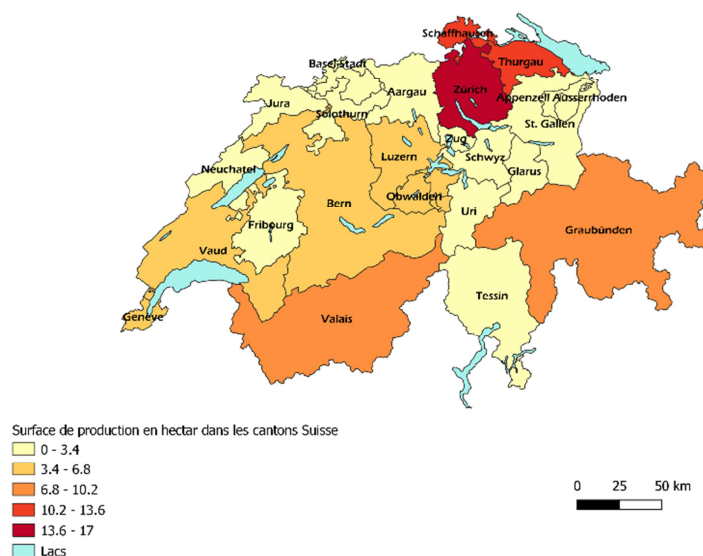


Figure 4 : Répartition des surfaces de cultures de framboises d'automne dans les cantons suisses: les surfaces du Vaud et de Genève, de la Thurgovie et du Schaffhouse et de l'Obwald, du Nidwald et du canton de Lucerne.(Chambreuil T. à partir des données de Fruit-Union Suisse 2020)

Répartition des surfaces de production des cultures de framboises d'été

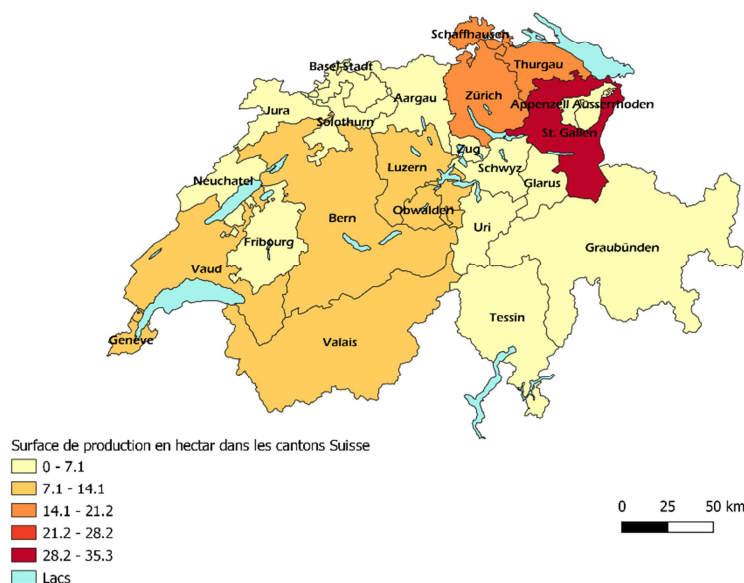


Figure 5 : Répartition des surfaces de cultures de framboises d'été dans les cantons suisses: les surfaces du Vaud et de Genève, de la Thurgovie et du Schaffhouse et de l'Obwald, du Nidwald et du canton de Lucerne. (Chambreuil T. à partir des données de Fruit-Union Suisse 2020).

2. Défis actuels de la filière

L'OFAG souligne que les fruits suisses sont assez peu exportés, ceci étant dû aux coûts de production élevés observés en Suisse, notamment à ceux de la main d'œuvre. En effet, entre 2015 et 2018, seulement 25 tonnes de fraises étaient exportées en moyenne par an contre plus de 6800 tonnes produites et 14 000 tonnes importées.

La réglementation concernant l'importation favorise la vente de la production indigène des fraises et des framboises. En effet, pendant la période de production suisse, les produits importés sont soumis à une taxe supplémentaire (OIELFP, 1998). A noter que cette protection n'existe pas pour les myrtilles. Ces taxes sur l'importation favorisent ainsi la consommation des produits du pays. Notons aussi que la production suisse présente des pics de production importants en été et n'a donc pas des périodes de récolte très étendus. En dehors des pics de production, l'importation est alors libre et les fruits produits en Suisse sont alors confrontés à la concurrence des marchés étrangers (SwissFruit, 2017).

Enfin, la production de fraise est négativement impactée par de nombreux organismes nuisibles comme l'oïdium, la pourriture grise, les pucerons, les thrips, l'acarien tétranyque et des ravageurs émergents comme la mouche *Drosophila suzukii* (Fisher, 2004). Des dégâts importants sont induits dans les cultures de framboises par le dépérissement des racines, l'anthracnose, le ver du framboisier, les acariens (tétranyques et ériophyes) et *Drosophila suzukii* (Fisher, 2004) (SwissFruit, 2017).

C. Eclairage artificielle en horticulture

1. Besoins en lumière des végétaux

a) Photosynthèse

La photosynthèse permet aux plantes de synthétiser des molécules organiques à partir d'eau et de dioxyde de carbone (CO_2) grâce à l'énergie de la lumière. Cette réaction chimique est exprimée de la façon suivante : $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$

La photosynthèse se déroule dans les chloroplastes qui sont des organites contenus dans les cellules des tissus verts. Les chloroplastes contiennent des thylakoïdes dont la membrane est le lieu d'action des pigments photosynthétiques qui réagissent en chaîne pour canaliser l'énergie vers un centre actif. La chlorophylle *a* est le pigment principal qui assure la photosynthèse dans le centre actif des photosystèmes. La chlorophylle *a* a la particularité

d'absorber la lumière visible à des longueurs d'onde dans le bleu et dans le rouge (d'où sa couleur verte). Pour la photosynthèse, seule la chlorophylle *a* est véritablement active mais elle est toujours accompagnée de pigments dits accessoires comme le chlorophylle *b* et les caroténoïdes qui permettent de réceptionner des longueurs différentes pour retransmettre l'énergie à la chlorophylle *a* (**Figure 6**). Le premier centre actif appelé photosystème 1 permet de transformer l'énergie de résonnance des photons en énergie chimique. S'ensuit alors une succession de réactions d'oxydo-réduction qui permettent de créer un gradient de proton entre l'intérieur et l'extérieur du thylakoïde (lumen et stroma) et ainsi d'engendrer la production d'ATP et de NADPH (Kouchkovsky, 1983). Lorsqu'assez d'énergie chimique est accumulée sous forme d'ATP et de NADPH, elle alimente un cycle de réaction appelée cycle de Calvin au cours duquel des sucres sont produits. Ces sucres sont ensuite utilisés par la plante comme réserve d'énergie et pour produire d'autres molécules organiques. La quantité et la qualité de la lumière est donc essentielle à la réalisation de la photosynthèse [5].

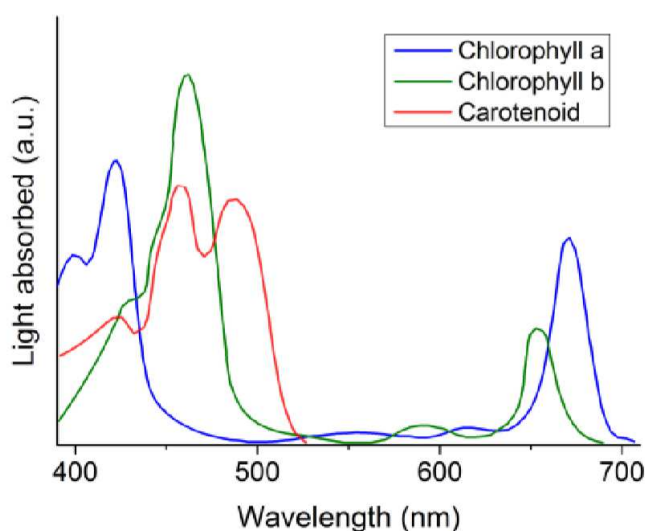


Figure 6 : Spectres d'absorption de la chlorophylle et des pigments accessoires (Singh et al., 2015)

b) Photomorphogénèse

La qualité et la quantité de la lumière jouent également des rôles importants dans les processus dits de photomorphogénèse dans lesquels les photons agissent comme des signaux. Trois types de photorécepteurs (phytochromes pour la lumière rouge et rouge lointain; les phototropines pour la lumière bleue; cryptochromes pour lumière bleue) permettent à la plante de connaître la qualité de la lumière reçue, sa direction, ou encore la durée du jour naturel (photopériode). En effet, la perception de la photopériode permet à la plante de percevoir les changements de saison et ainsi d'activer sous certaines conditions des mécanismes tels que la floraison, la levée de dormance ou la germination (Invenio 2015).

Ainsi, une maîtrise de la lumière et notamment de la durée d'éclairage peut permettre de maîtriser l'initiation florale et ainsi avoir une production plus précoce (GASTON ,A., 2010). Il a été démontré sur des plantes cultivées in vitro l'intérêt des LED sur la photomorphogénèse, notamment sur l'expression des gènes de la photomorphogénèse. La lumière est ainsi impliquée dans la biosynthèse des pigments photosynthétiques (Batista et al., 2018).

Le ratio des lumières rouge et rouge lointain est aussi impliqué dans les processus de floraison et la maîtrise de ces ratios notamment pour les plantes dites de jours longs peut permettre une maîtrise des processus de floraison (Zahedi & Sarikhani, 2017). Les ratios

n'affectent pas les plantes de la même façon suivant leur stade de développement et le type de variété (de jours longs ou de jours courts).

2. Présentation des différents types d'éclairage artificiel

L'éclairage dans les productions horticoles sous abri est utilisé depuis longtemps. Initialement, les lampes à incandescence, les lampes au sodium haute pression (HPS), les lampes aux halogénures métalliques (HM) et les lampes fluorescentes ont été employés pour augmenter la quantité de lumière disponible aux cultures. Cependant, la plupart de ces types d'éclairage dégagent beaucoup de chaleur et leur efficacité énergétique est assez faible. Récemment, les lampes LED, de l'anglais « light emitting diode », commencent à être utilisées. Ces lampes sont basées sur la technologie des semi-conducteurs avec des transferts d'électron nécessitant peu d'énergie en comparaison avec les lampes jusqu'alors utilisées (Niangoran et al., 2020). A titre d'exemple, les lampes à incandescence convertissent moins de 5% de l'énergie électrique en énergie lumineuse tandis que les LED convertissent plus de 50% de l'énergie électrique en énergie lumineuse. L'énergie électrique nécessaire est donc moindre avec les LED qu'avec les lampes utilisées habituellement comme les lampes HPS (High Pressure Sodium). Notons que suivant les matériaux utilisés comme semi-conducteur dans les LED, il est possible de faire varier le spectre lumineux émit par la lampe. En horticulture, les spectres lumineux utilisés sont donc souvent produits par des puces LED rouges et bleus (Yeh & Chung, 2009). En effet, nous avons précisé ci-dessus que les végétaux utilisaient essentiellement des longueurs d'onde dans le bleu et le rouge. Il n'est donc pas nécessaire de reproduire l'ensemble du spectre visible pour qu'une plante effectue la photosynthèse ou déclenche les signaux nécessaires à la photomorphogenèse. Les ratios rouge/rouge lointains étant aussi importants dans les processus de floraison, certaines LED ont des puces de rouges lointains qui permettent une meilleure maîtrise de la floraison suivant les espèces et les variétés considérées. Les spectres peuvent être adaptés suivant les besoins des différentes espèces et variétés et les objectifs des producteurs. Ainsi, la consommation énergétique en est d'autant plus réduite. Les lampes HPS ou MS produisent quant à elles des spectres avec une forte proportion de jaune et d'orange, des longueurs d'onde moins adaptées aux besoins des végétaux (Invenio 2015).

Enfin, un autre avantage des LED est leur durée de vie avec environ 100000h d'éclairage contre 1000h avec des lampes à incandescence ou 8000h avec des lampes à fluorescence (Yeh & Chung, 2009).

3. Impact de l'ajout de lumière artificielle sur la culture des fraises et des framboises

L'apparition des LED et de l'éclairage en général a permis d'envisager la production horticole différemment. Les LED peuvent apporter une source lumineuse supplémentaire par rapport à la lumière du soleil mais est aussi utilisée désormais dans des chambres de culture indoor en substitution complète de l'apport lumineux du soleil.

Avec la technologie LED, il s'agit à l'heure actuelle d'évaluer si l'augmentation des rendements permet la rentabilisation d'un tel investissement. Dans la présente étude, on s'intéressera à l'éclairage en complément de la lumière du soleil et non en substitution. Dans ce cas-là, les LED permettent une augmentation de l'intensité lumineuse reçue par les végétaux ainsi que la durée journalière d'éclairement appelée photopériode.

Jusqu'ici, l'ajout de lumière artificielle est peu utilisé en production en Suisse pour la production de petits fruits, principalement pour des raisons de coûts dus à la consommation électrique. Afin d'être rentable, l'augmentation du rendement, et potentiellement de la qualité, induits par les LED doit permettre de couvrir la consommation électrique et également l'amortissement de l'investissement important généré par les lampes (plusieurs centaines de CHF par hectare). Cependant, l'éclairage artificiel est déjà utilisé pour la production de petits fruits dans des pays plus au nord comme les Pays-Bas, la Norvège et le Japon.

a) Rendement

Des essais en Norvège, où l'intensité lumineuse est plus faible, ont été effectués et ont montré un rendement significativement plus élevé pour les plants de fraises cultivés sous LED (Nestby & Trandem, 2013). Au Japon également, des essais avec des durées de jour de 12h ont montré de meilleurs rendements aussi qu'avec des lampes à incandescence. Ainsi, en plus d'être moins énergivore, les LED seraient plus efficaces en termes de rendement que les lampes à incandescence (Hidaka et al., 2013).

Il a aussi été mis en évidence par certaines études que les LED pouvaient entraîner une augmentation de la croissance végétative sans effet sur le rendement en fruits (Li et al., 2012). Il s'agira donc pour les producteurs d'avoir des spectres adaptés aux cultures.

b) Impact sur le métabolisme (antioxydants, volatiles, etc)

La photosynthèse étant à l'origine de la production des sucres de la plante, nous pouvons nous attendre à ce que la teneur en arôme et le goût de fruits soient modifié par l'action des LED. Une étude sur des productions coréennes en serre plastique a montré une augmentation du taux de sucre et des composés phénoliques suivant les spectres lumineux utilisés (Choi et al., 2015). De même, aux Pays-Bas, il a été constaté que les fraises récoltées sous LED présentaient une meilleure qualité gustative en terme de sucre et acidité et nutritive en terme de vitamine C avec des intensités lumineuses relativement faibles (entre $90 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Hananberg et al., 2016).

D. Enjeux et problématisation du stage

1. Présentation d'Agroscope

L'Agroscope est un centre de recherche agronomique de la Confédération suisse. Il a pour mission principale de recherche au service des producteurs et des professionnels de toute la filière agroalimentaire. Le centre de Conthey abrite entre autre le groupes petits fruits et baies au sein duquel le projet de développement de culture de petits fruits sous lumière LED est actuellement développé.

2. Origine de la démarche / problématique

Les petits fruits sont très populaires en Suisse où la consommation locale est favorisée sur la période de production par des contingents. La part de production sur substrat ne cesse d'augmenter et les producteurs suisses cherchent à limiter les pics de production afin d'étaler les productions dans le temps. Actuellement, l'éclairage artificiel est assez peu répandu pour des raisons de coûts énergétiques et de coût d'installation. Cependant l'utilisation dans certains pays des lumières LED donnent à penser que cette technologie d'éclairage pourrait permettre de pallier aux principaux freins de la production sans engendrer de coûts trop important pour les producteurs.

3. Question de recherche et hypothèses associées

Question de recherche : L'ajout de lumière LED a-t-il un intérêt pour la production suisse de fraises et de framboises ?

Hypothèse 1 : Les LED permettent une augmentation du rendement.

L'augmentation artificielle de la quantité de lumière reçue par les plantes devrait permettre une croissance plus rapide et un rendement en fruits plus élevé. Les résultats de l'étude doivent également permettre de déterminer si la production sous LED sur le territoire suisse est économiquement viable.

Hypothèse 2 : La qualité des fruits n'est pas impactée négativement par l'ajout de lumière LED.

Il est important de démontrer que la qualité des fruits ne soit pas diminuée autant au niveau des composés nutritifs essentiels tels que les composés antioxydants, que d'un point de vue du goût et des arômes.

II. MATERIEL ET METHODE

A. Matériel végétal

1. Fraise

Les fraises utilisées sont des fraises de la variété 'Murano' (plants pré-cultivés de type « Trayplant »). La fraise 'Murano' est une variété remontante qui permet une récolte échelonnée au cours de la saison du printemps à l'automne. Les plants sont nettoyés régulièrement au cours de la saison pour enlever les tiges mortes et les stolons ayant poussé afin de favoriser la production de fruits.

2. Framboise

Les framboises utilisées sont des plants de type « long cane » de la variété 'Versailles'. La variété 'Versailles' est une variété remontante. Les plants ont été taillés une fois au cours de la saison à la fin du mois de juin.

B. Structure de l'essai

Les essais avec les fraises et les framboises sont effectués dans des tunnels différents. Que ce soit pour les fraises ou les framboises, l'essai est constitué de quatre blocs contrôle sans lumière artificielle (variante « CTRL ») et quatre blocs sous lumière LED (« LED »). Leur répartition est précisée dans les **Figure 8** et **Figure 9**. Dans la suite de ce rapport, on nommera les fraises ayant été cultivées avec la lumière LED « fraises LED » et les fraises des blocs contrôles, « fraises CTRL ». On fera de même pour les framboises : « framboises LED » et « framboises CTRL ». A titre indicatif, des numéros sont attribués à chacun des blocs de la serre de framboise, notons que les numéros de framboises LED sont le 3, le 4, le 25 et le 26 et que les numéros des framboises CTRL sont le 1, le 21, le 22, le 25 et le 26. Les fraises ont été plantées le 20 mars en serre dans des bacs de substrat sur gouttière (**Figure 10**) On compte trois plants par bacs. Les framboises ont été plantées en août 2018 dans des pots au sol (**Figure 7**) avec deux cannes par pots pour une production sur plusieurs années.



Figure 7 : Plantation de framboises sur substrat dans des pots au sol (Conthey-Suisse-, le 10 août 2020, Chambreuil T.)

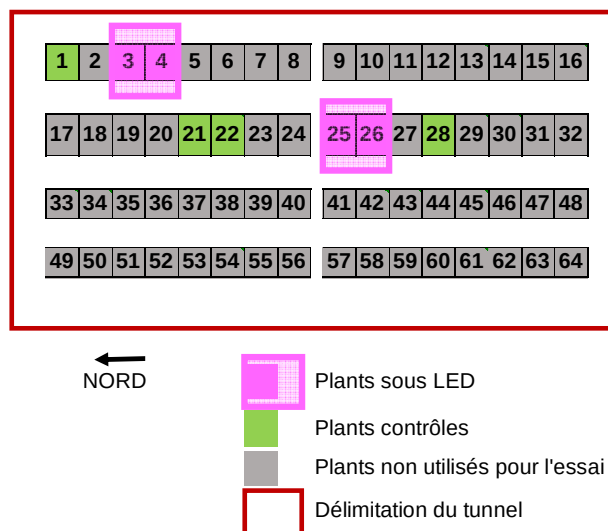


Figure 8 : Plan de la serre de l'essai de framboises (Chambreuil T.)

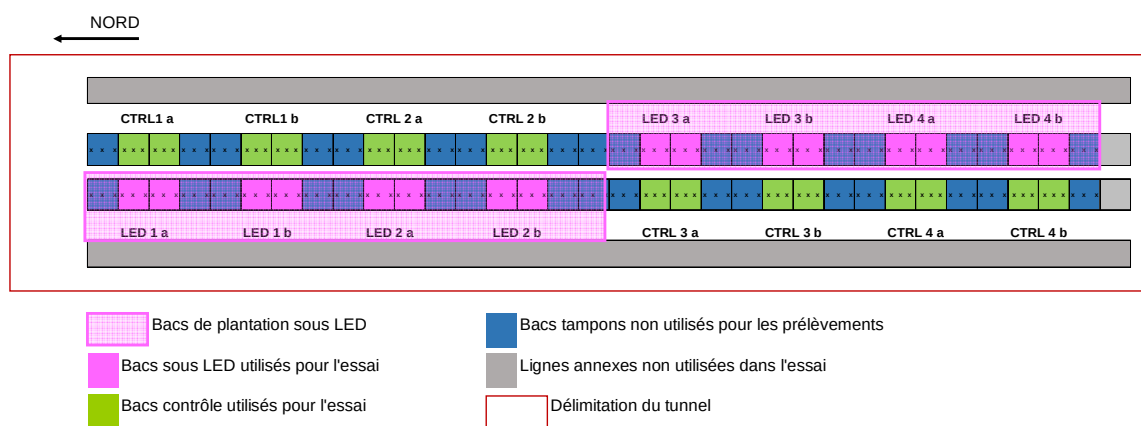


Figure 9 : Plan de la serre de l'essai de fraises (Chambreuil T.)

C. Eclairage

L'éclairage des fraises est effectué par des lampes LED (The futur of grow ; AIR GROW 200W ; qualité du spectre : **Figure 14**; puissance réglable ; puissance maximale : 200W ; Sortie PPF maximale : $460\mu\text{mol/s}$; Rendement énergétique : $2.3\mu\text{mol/j}$; dimension d'une lampe : $1025 \times 90 \times 73\text{mm}$) placées à 30 cm au-dessus du sommet des plants de fraises **Figure 10** et **Figure 11**. Les lampes ont, de ce fait, été réajustées à la fin de la croissance des plants afin que les plants ne touchent pas les lampes. Un système de contrôle (TrolMaster, Hydro-X Environment Control System (HCS-1)) connecté à une sonde PPF (TrolMaster, Full Spectrum Quantum Sensor (MBS-PAR)) permet de maintenir un apport lumineux total constant de minimum $400\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ sur les plantes pendant 18 h (nuit de 6 heures). L'éclairage et l'extinction des lampes s'effectuent de manière progressive pendant 30 minutes afin de reproduire au mieux la lumière naturelle (lever et coucher du soleil).

L'éclairage des framboises est effectué par des lampes LED (SANlight FLEX Series; qualité du spectre : **Figure 15**; puissance réglable ; puissance maximale : 161W ; Sortie PPF maximale : $40,7\mu\text{mol/s}$; Rendement énergétique : $1.3\mu\text{mol/j}$; dimension d'une lampe : $2000 \times 31 \times 25\text{mm}$) Les lampes utilisées pour les framboises ne sont pas placées au-dessus des plants mais sur les côtés de manière à éclairer une plus grande partie des plants **Figure 12**. et **Figure 13**. Les lampes sont allumées de 6h à 9h le matin et de 18h à 22h le soir de manière à compléter au mieux la lumière du jour en prolongeant la photopériode sans régulateur.

Pour chacun des deux systèmes d'éclairage, un compteur électrique est installé pour mesurer la consommation électrique pendant l'essai.

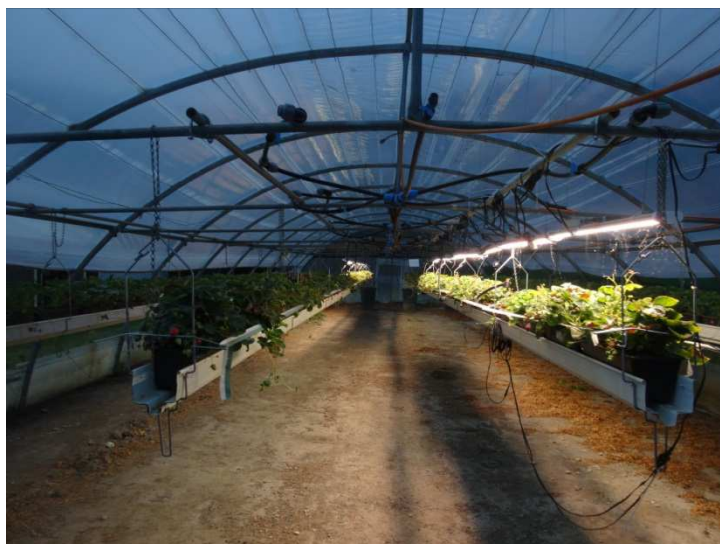


Figure 10 : Essai d'éclairage LED sur fraises (Conthey-Suisse-, le 10 août 2020, Chambreuil T.)



Figure 11 : Fraises cultivées sous l'éclairage LED (Conthey-Suisse-, le 10 août 2020, Chambreuil T.)



Figure 12 : Système d'éclairage LED de l'essai sur les framboises (Conthey-Suisse-, le 10 août 2020, Chambreuil T.)



Figure 13 : Système d'éclairage LED de l'essai sur les framboises (Conthey-Suisse-, le 10 août 2020, Chambreuil T.)

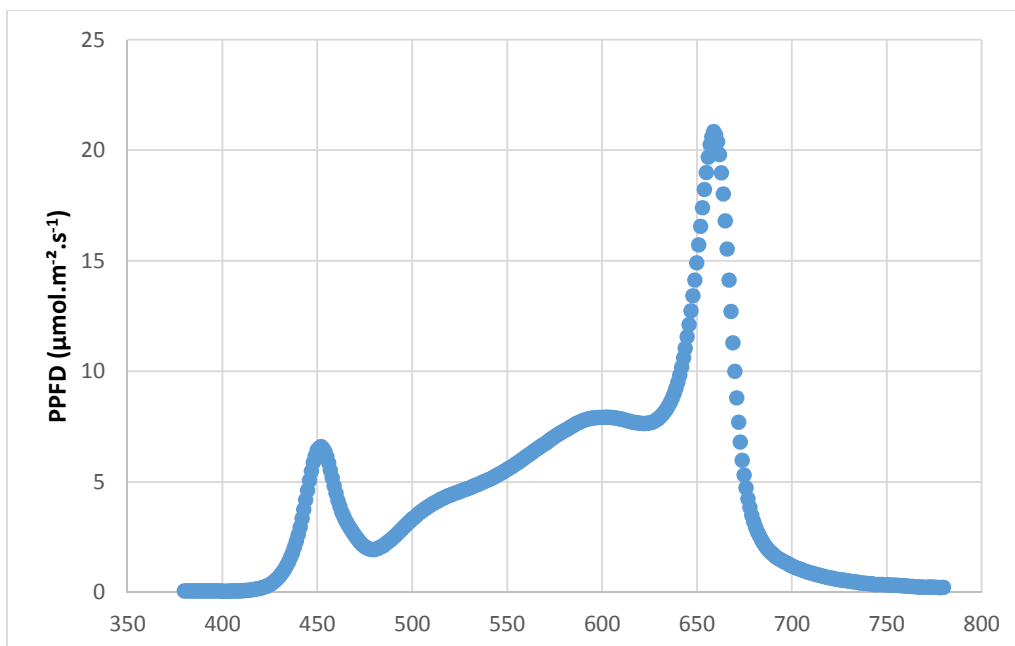


Figure 14 : Spectre lumineux des lampes LED utilisées sur l'essai des fraises mesuré avec un spectromètre portable (UPRtek, PG100N)

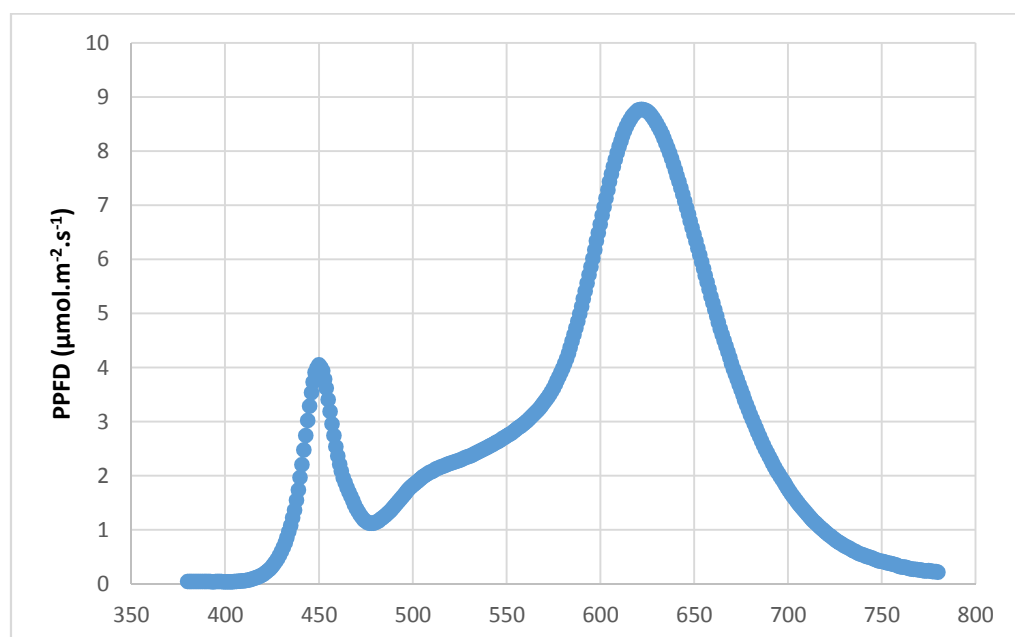


Figure 15 : Spectre lumineux des lampes LED utilisées sur l'essai des framboises mesuré avec un spectromètre portable (UPRtek, PG100N)

D. Calcul du rendement

Les fruits sont récoltés chaque semaine bloc par bloc. L'ensemble des fruits récoltés pour un bloc sont pesés ensemble en faisant la distinction entre les fruits de premier choix et ceux de deuxième choix trop petits ou trop déformés pour être commercialisés en tant que fruit de premier choix.

Le rendement est calculé pour chacun des blocs contrôle et sous LED, et ramené à un rendement par plants.

E. Analyse de la photosynthèse

La mesure de la photosynthèse est effectuée grâce à l'appareil LI-COR LI-6800. L'appareil est doté d'une chambre qui peut se fermer en pinçant la feuille de façon assez

hermétique et dans laquelle différents paramètres peuvent être maîtrisés tels que la teneur en CO_2 ou l'intensité lumineuse. Pour chacun des blocs, l'appareil est placé successivement sur 5 feuilles différentes avec une intensité lumineuse dans la chambre réglée à $800 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ et un niveau de CO_2 à $1000 \mu\text{mol.mol}^{-1}$ avec des mesures toutes les 10 secondes pendant 1,5 minute. Seules les dernières mesures seront exploitées à chaque fois. Le choix des valeurs fixes des paramètres injectés (lumière et CO_2) a été effectué suite à une étude préalable mesurant la photosynthèse lors d'une variation de CO_2 de 0 à $1400 \mu\text{mol.mol}^{-1}$ et d'une variation de l'intensité lumineuse de 0 à $1600 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Les résultats de cette étude préalable sont donnés en **Figure 16** et **Figure 17**. On constate que la photosynthèse sature au-delà de $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 injecté et $800 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de lumière. Ainsi, ce sont ces paramètres que nous utilisons pour analyser la photosynthèse maximale d'une feuille. On s'intéressera à l'évapotranspiration ainsi qu'au flux en CO_2 mesurés respectivement en $\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ et en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ce test a été effectué aussi sur framboises et donne des résultats similaires pour les variations de CO_2 et un seuil légèrement inférieur à celui des fraises pour l'apport en lumière. On considérera les seuils similaires et on utilisera les mêmes paramètres pour les mesures de photosynthèse pour les fraises et les framboises.

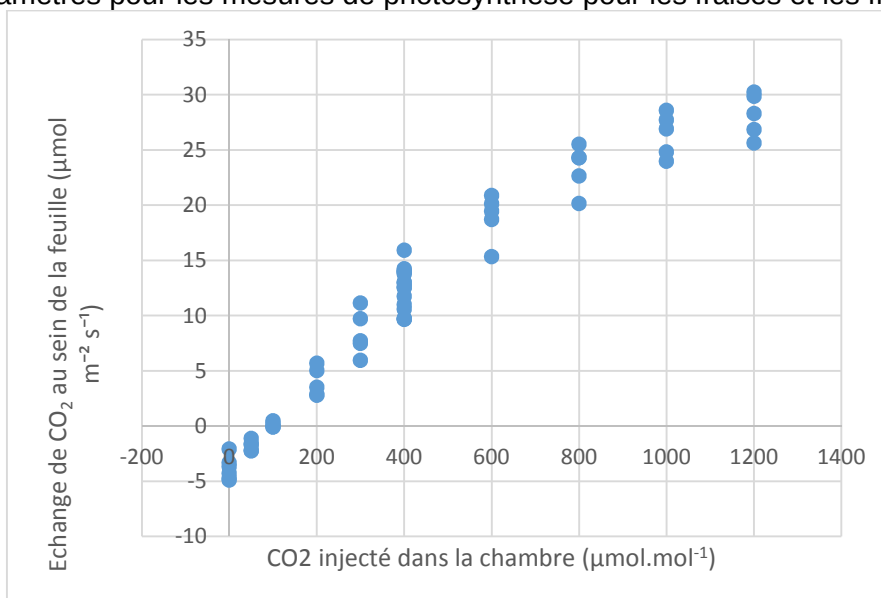


Figure 16 : Variation de la photosynthèse en fonction de l'apport en CO_2

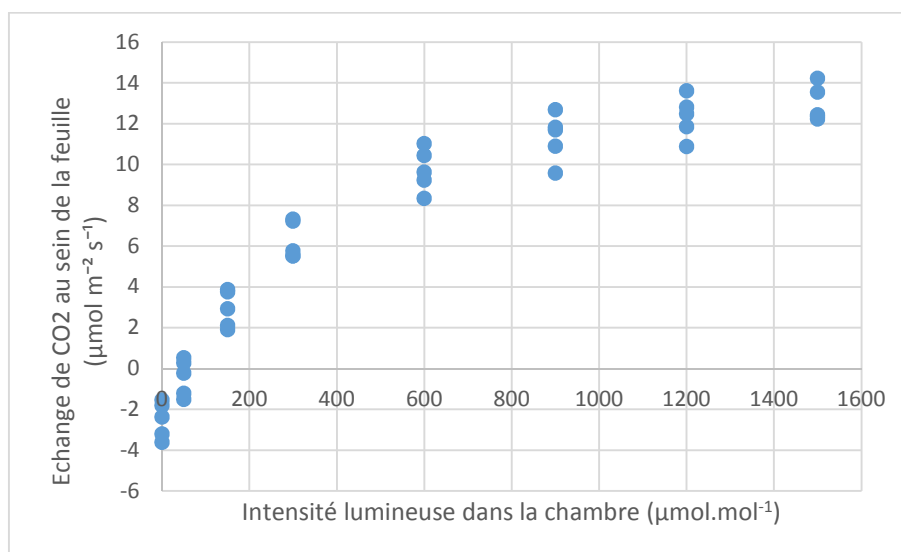


Figure 17 : Variation de la photosynthèse en fonction de l'intensité lumineuse

F. Analyse de la croissance végétative à l'aide d'un scanner 3D à spectre multiple

La croissance végétative des fraises a été mesurée grâce à l'appareil PlantEye F500 de Phenospex qui est un scanner 3D à spectre multiple (**Figure 18**). Deux bacs de trois plants sont ainsi analysés pour chacun des blocs chaque semaine pendant 5 semaines de la phase végétative. Ainsi, la surface foliaire et la hauteur des plants sont mesurées.

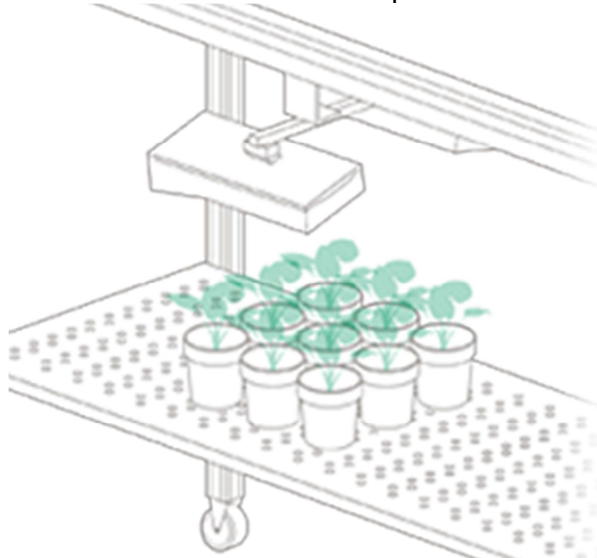


Figure 18 : Scanner 3D PlantEyeF500 Phenospex (image Phenospex)

G. Analyse des antioxydants

1. Préparation de poudre de fruit

Dix fruits par blocs (répétitions) sont écrasés dans une boîte de pétri puis immédiatement congelés à -80°C . Les fruits écrasés et congelés sont ensuite lyophilisés puis replacés à -80°C afin d'obtenir une purée de fruits dure facile à écraser au mortier. Des poudres de fruits sont réalisées pour chacun des blocs en fraises et en framboises avec dix fruits par bloc récoltés au mois de mai et dix fruits par bloc récoltés au mois de juin.

2. Extraction

Un gramme de poudre de fruit à -80°C est extrait dans 10ml de solution d'extraction (MeOH 80%, acide formique 99:1 (v/v)). Les échantillons sont homogénéisés dans un bain à ultra-son pendant 10 minutes puis centrifugés à 3'000 g dans une centrifugeuse Rotanta 460R Hettich pendant 10 minutes. Le surnageant est transféré dans un tube de 2ml et centrifugé à nouveau (Centrifugeuse Eppendorf 5424 R) à 16'000 g pendant 10 minutes.

3. DPPH

L'analyse des antioxydants est réalisée grâce aux propriétés du 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) qui a une bande d'absorption à 516 nm sous la forme oxydée et qui disparaît lorsque le DPPH est réduit par des composés antioxydants (Brand-Williams et al., 1995). La mesure des antioxydants est alors effectuée avec la méthode de Pineli *et al.* avec les modifications suivantes :

Une solution de DPPH de 40mg/l est réalisée. Une solution standard de Trolox à 1000 ppm (1 g/l) est réalisée avec des dilutions à 100/80/60/40/20/10 et 0 ppm. Dans le puits des plaques de lecture on introduit 25 μl d'échantillon (solution de fraise ou framboise extraite ou solution diluée de Trolox) et de 300 μl de réactif (solution de DPPH). Les solutions sont incubées dans les plaques de lecture pendant une demi-heure puis l'absorption des plaques est lue à 516 nm par spectrophotomètre Infinite M Plex de Tecan.

4. Folin Ciocalteu

Le mélange de Folin-Ciocalteu est constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$) qui est réduit en présence de phénols en oxydes bleus de tungstène (W_8O_{23}) et molybdène (Mo_8O_{23}). La solution admet alors un maximum d'absorption à environ 750 nm qui est proportionnelle à la concentration de l'extrait en composés phénoliques (Pineli et al., 2011) (Boizot & Charpentier, 2006).

Une solution de réactif de Folin est réalisée dans de l'eau distillée 16 :1 (v/v). Une solution de Na_2CO_3 est réalisée à 10%. Une solution standard d'acide ellagique est réalisée à 1000 ppm (1g/L) avec des dilutions à 500/400/300/200/100/50 et 0 ppm. Dans le puits des plaques de lecture introduction de 25 µl d'échantillon (solution de fraise ou framboise extraite ou solution diluée d'acide ellagique) et de 250 µl de réactif de Folin. Incubation pendant 10 minutes. Introduction de 25 µl de solution de Na_2CO_3 . Incubation pendant 20 minutes puis lecture à 750 nm de l'absorption par spectrophotomètre Infinite M Plex de Tecan.

H. Analyse du sucre et de l'acidité

Des jus sont réalisés à partir de fruits récoltés le jour même (nombre de fruit variables en fonction des récoltes entre 20 et 50). Le taux de sucre, plus précisément la fraction de saccharose, est mesurée en degré Brix avec un réfractomètre ATAGOTM PAL-1. Trois mesures sont effectuées sur un même échantillon pour effectuer une moyenne. Les acides titrables sont mesurés grâce un titrateur automatique 719 S Titrimo de Metrohm.

I. Analyse de la fermeté

La fermeté des fruits est mesurée avec l'appareil Firmtech FT7 (UP Umweltanalytische Produkte GmbH). A l'aide d'un piston, l'appareil applique une pression jusqu'au seuil 200g pour les fraises et 100g pour les framboise. L'appareil calcule la fermeté en g/mm suivant la distance parcouru par le piston et la force appliquée. La fermeté est mesurée sur 20 fruits par blocs est mesurée une à deux fois par mois suivant la production.

J. Analyse des composés aromatiques en GC-MS

L'analyse des composés aromatiques est effectuée par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse, GC-MS de l'anglais « Gas Chromatography – Mass Spectrometry ». Dix fruits de chaque bloc de l'essai ont été découpés en gros morceaux puis immédiatement congelé à -80° . La méthode utilisée pour l'analyse des composés aromatiques est celle développé par Fuchsmann *et al.* 2019 pour le *Dynamic Headspace Vacuum Transfer In-Trap Extraction* DHS-VTT qui consiste en une extraction des composés aromatiques en « head space » (Fuchsmann et al., 2019). Brièvement, les fruits congelés sont broyés en poudre fine puis analysé par GC-MS. Un boîtier permet de maintenir les échantillons injectés dans le GC-MS à très basse pression. Les échantillons sont alors séparés par chromatographie sur phase gazeuse (GC) connecté un spectromètre de masse (MS) (**Figure 19**) qui permet de déterminer la masse des composés volatiles libéré par l'échantillon. Les chromatogrammes obtenus sont ensuite intégrés automatiquement par le logiciel Profinder puis une première analyse statistique OPLS sur le logiciel SIMCA est effectuée afin d'évaluer quels composés ont le plus d'influence sur les différences observées entre les fruits produits sous lumière LED et les fruits contrôle. Les pics des composés sélectionnés sont ensuite intégrés manuellement sur le logiciel Profinder et un nouveau test statistique avec un test de Wilcoxon sur le logiciel R est effectué pour déterminer les composés établissant une différence significative entre les fruits produits sous LED et les fruits contrôles. Les composés sont identifiés dans la base NIST grâce à leur spectre de fragmentation.

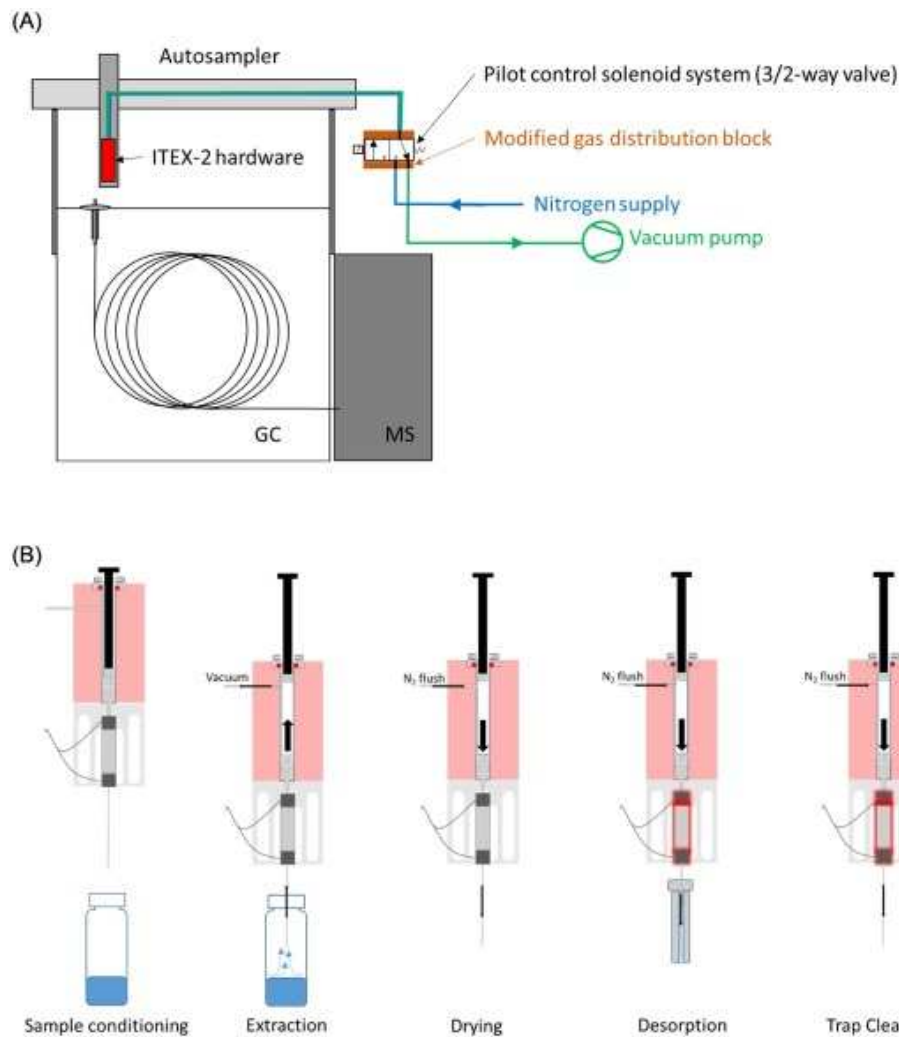


Figure 19. Fonctionnement de la GC-MS pour l'analyse des composés aromatiques (Fuchsmann et al., 2019)

K. Analyse de l'impact de l'éclairage sur la présence de ravageurs dans l'essai fraise

Un décompte des thrips observés sur 10 hampes florales de fraise a été effectué sur les plants contrôles et sur les plants sous LED à trois dates différentes au cours du mois de juillet.

L. Analyses des données

Les données ont été analysées avec un test statistique de Wilcoxon impair sur le logiciel R. Ce test statistique non-paramétrique permettant de comparer la moyenne deux groupes de données a été choisi car la taille des échantillons (4 répétitions) ne permet pas de déterminer si la distribution des données est normale.

III. RESULTATS

A. Fraise

1. Croissance végétative, photosynthèse et rendement

a) Croissance végétative

On constate en premier lieu que les LED ont un impact significatif sur la croissance végétative du fraisier. La hauteur des plants sous LED est environ inférieure de moitié par rapport aux plants CTRL déjà un mois après l'installation des LED (le 27 mars)(Figure 20).

La surface foliaire semble également plus importante (**Figure 21**) mais les résultats sont significatifs seulement un mois et demi après l'installation des LED. L'ajout de lumière entraîne donc sur les plants de fraisier une diminution du développement végétatif en hauteur et en surface foliaire.

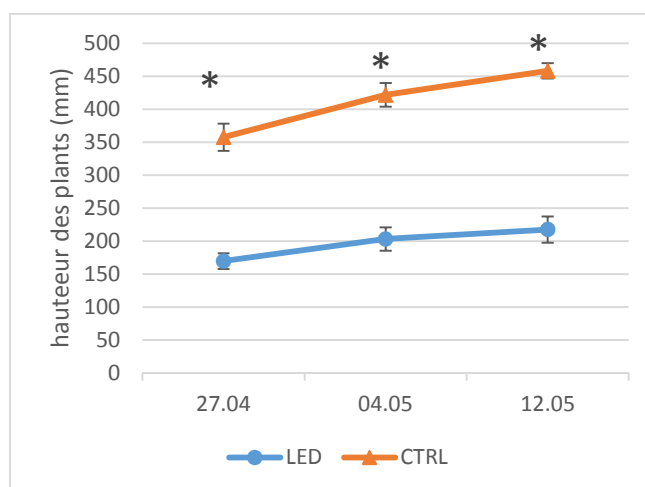


Figure 20 : Hauteur des plants de fraisiers au cours du temps avant fructification. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

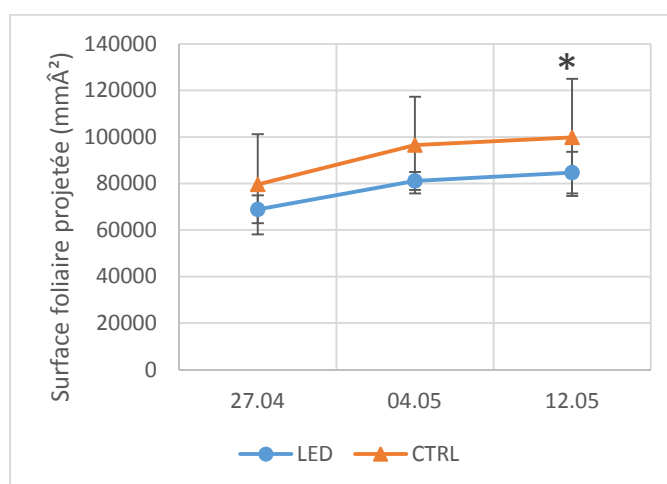


Figure 21 : Surface foliaire projetée au cours du temps des plants de fraisier. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

b) Photosynthèse et échange gazeux au sein de la plante

Contrairement, aux hypothèses formulées précédemment, les mesures effectuées ne mettent pas en évidence une activité photosynthétique différente en présence de LED (**Figure 22**). En effet, les échanges gazeux mesurés sur les feuilles des fraises semblent similaires sur plants LED et plants CTRL. Les différences ne sont pas significatives mais les plantes semblent montrer une évapotranspiration légèrement plus importante sous les LED par rapport au témoin CTRL (**Figure 23**).

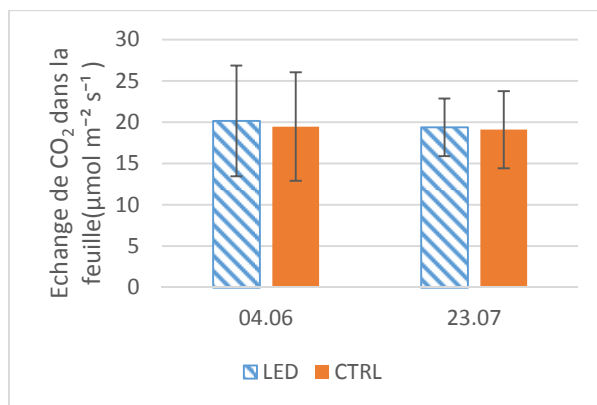


Figure 22 : Photosynthèse mesurée en CO_2 absorbée par la feuille de fraisier. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

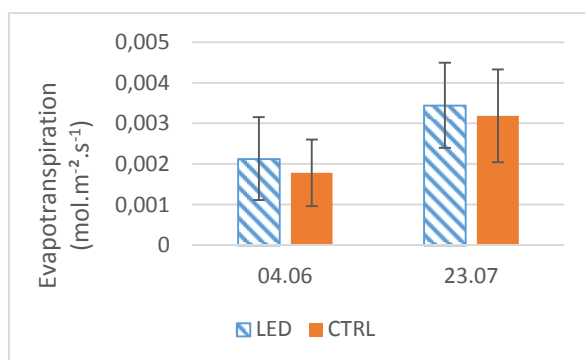


Figure 23 : Evapotranspiration de la feuille de fraisier. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

c) Rendement

Pour le calcul du rendement et la pesée des fruits, les fruits de second choix sont séparés des fruits de premier choix. Cette distinction se fait en fonction du calibre des fruits ainsi que des déformations éventuelles pouvant survenir lors du développement des fruits. Le rendement cumulé par plants sur les fraises de premier choix (**Figure 24**) présente un rendement des plants LED plus important tout au long de la saison mais cette différence est statistiquement significative à partir de la fin du mois de juillet, soit quatre mois après l'installation des LED. Notons que la différence entre les rendements des plants LED et des plants CTRL s'est accentuée au moment où les jours ont commencé à devenir plus courts. Le rendement cumulé de fraises LED est de 447g par plant sur la période étudiée (12.05.2020 au 06.08.2020) et de 290g pour les fraises CTRL. On compte exactement 48 plants de fraises LED et 48 plants CTRL. Ainsi on obtient au total 21 kg de fraises LED et 14 kg de fraises CTRL soit 7 kg de fraises LED en plus sur la saison. Notons qu'au mois de juin, une partie des plants de fraises ont subi un dépérissement mais les rendements ont été calculées uniquement sur les plants sains.

On constate aussi que la quantité de fraise de second choix est aussi plus importante pour les fraises LED (**Figure 25**) ce qui est confirmé à la **Figure 26** par l'étude des ratios entre les fruits de second choix et ceux de premier choix. Les différences entre les fraises LED et les fraises CTRL ne sont pas statistiquement significatives mais il existe une tendance semblant indiquer que la proportion de fraises de second choix est plus importante sur les plants LED que sur les plants CTRL.

Concernant les poids moyen des fruits de premier choix, (**Figure 27**) aucune différence majeure n'apparaît entre les fraises LED et les fraises CTRL ce qui bien entendu est aussi lié à la façon de récolter dans la mesure où les trop petits fruits sont triés et considérés comme fruits de second choix.

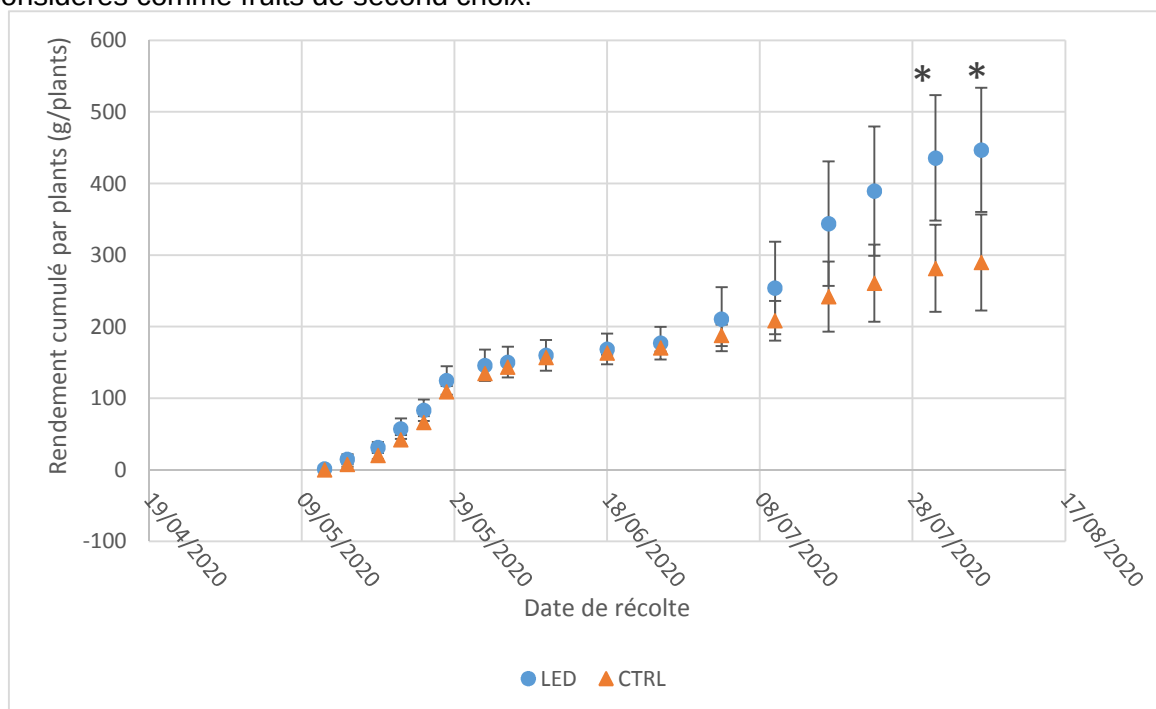


Figure 24 : Rendement cumulé moyen par plants de fraisiers au cours de la saison pour des fruits de premiers choix. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

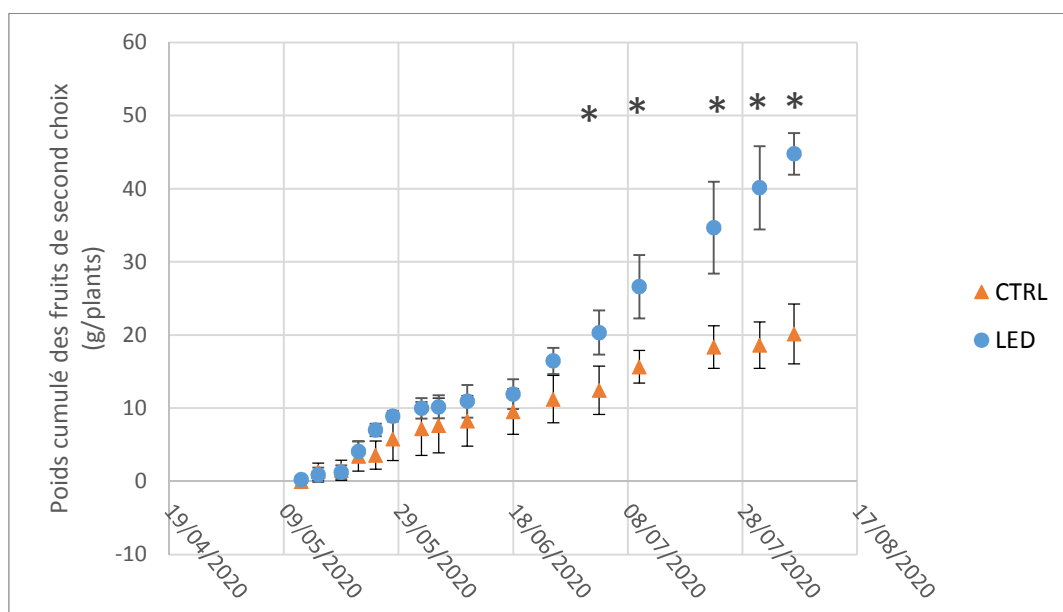


Figure 25 : Poids cumulé des fraises de second choix au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

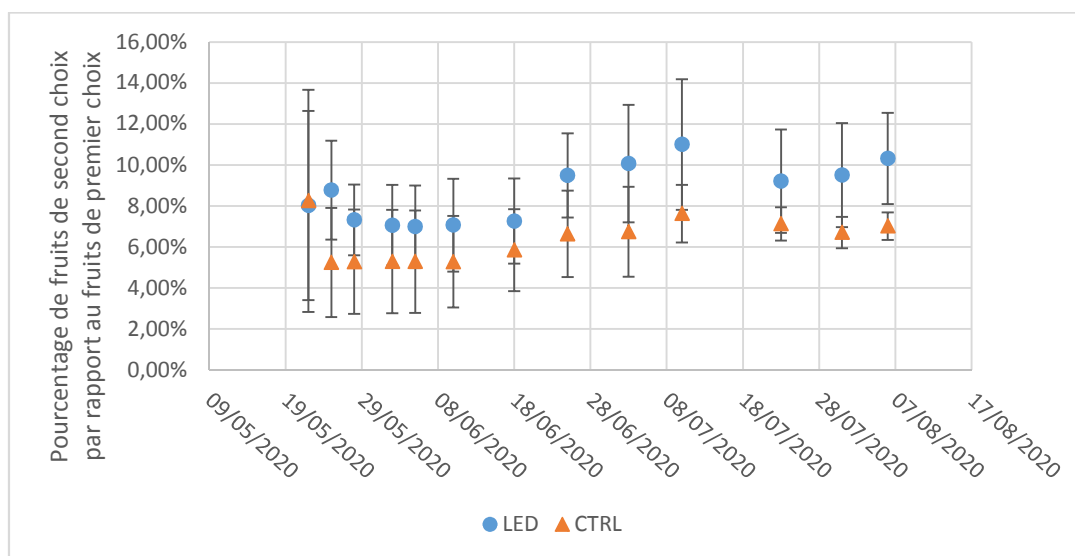


Figure 26 : Rapport des fraises de second choix sur les fraises de premier choix au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

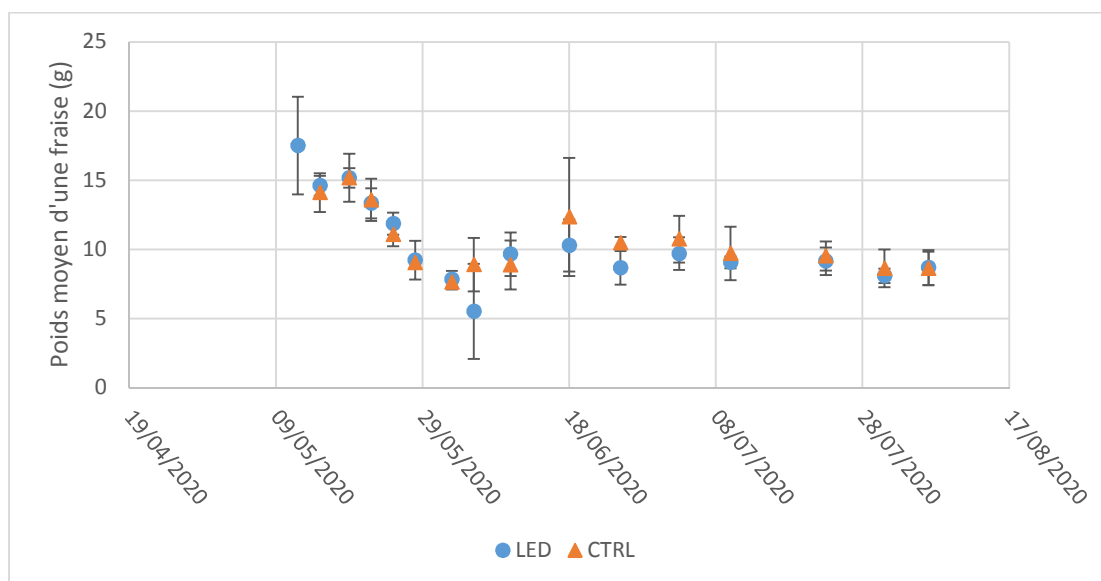


Figure 27 : Suivi du poids moyen d'une fraise de premier choix au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraises LED et les fraises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

d) Présence de maladies et ravageurs

Le suivi des thrips dans la serre de fraises ne présente pas de différence significative entre les plants CTRL (**Figure 28**) et les plants mais notons que l'attaque était plus forte au mois de juin et que des auxiliaires ont été placés dans la serre pour faire face à ce ravageur au mois de juillet. L'essai n'a donc pas permis de démontrer une quelconque influence des LED sur la présence de ravageurs.

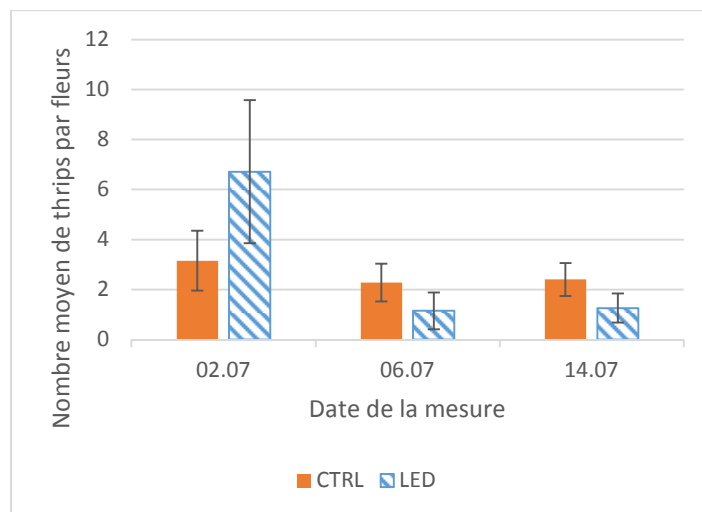


Figure 28 : Nombre moyen de thrips par fleurs au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraises LED et les fraises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

2. Qualité du fruit

a) Antioxydants

Le réactif de Folin permet une mesure des polyphénols totaux. La mesure au réactif de Folin est complétée par une analyse au DPPH qui permet d'analyser l'activité antiradicalaire des molécules d'une solution. La mesure au réactif de Folin (**Figure 29**) ne met pas en évidence une différence dans les teneurs en composés antioxydants dans les fraises. Cette observation est confirmée par la mesure au DPPH qui ne présente également pas de différence significative (**Figure 30**).

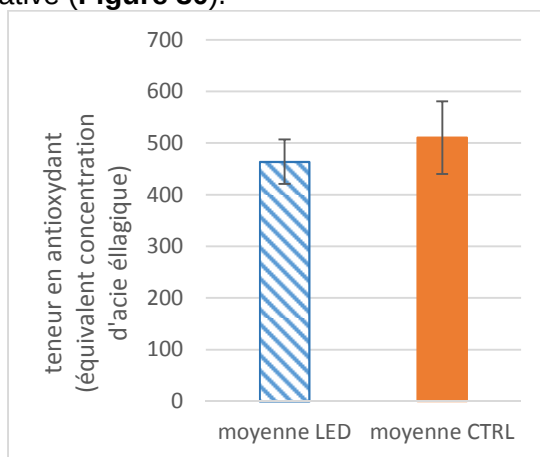


Figure 29 : Mesure de la teneur en polyphénols totaux sur des fraises du mois de mai avec le réactif de Folin Ciocalteu. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

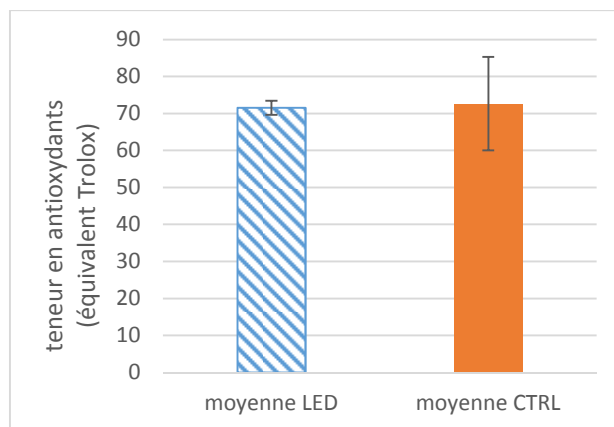


Figure 30 : Mesure de la teneur en composé antioxydants sur des fraises du mois de mai avec le DPPH. Les différences significatives entre les fraises LED et les fraises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

b) Sucre et acidité

La teneur en sucre et les mesure d'acidité ont été effectuées plusieurs fois au cours de la saison. Que ce soit pour la mesure de la fraction en saccharose ou la mesure de l'acidité, les teneurs sont assez constantes au cours de la saison (**Figure 31** et **Figure 32**). On constate quand même une légère diminution générale de la teneur en sucre et de l'acidité au cours de la saison, cependant les deux variables mesurées ne présentent pas de variation significative entre les fraises LED et les fraises CTRL. Notons également que l'acidité était particulièrement importante sur l'ensemble des fraises au mois de juin.

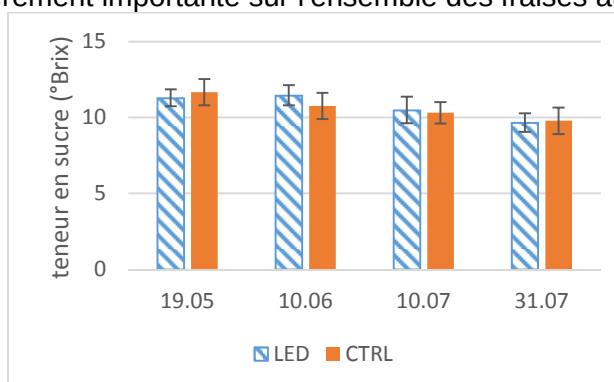


Figure 31 : Suivi de la teneur en sucre (teneur en saccharose) des fraises au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraises LED et les fraises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

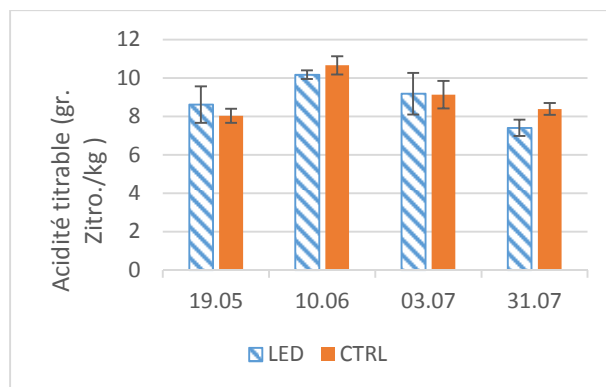


Figure 32 : Suivi de l'acidité des fraises au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraises LED et les fraises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

c) Fermeté

La texture des fruits ne semble pas non plus affectée par la présence de LED (Figure 31). En effet, le suivi de la fermeté des fraises au cours du temps ne dévoile pas de fraises plus fermes dans les variantes LED ou sans LED (**Figure 33**).

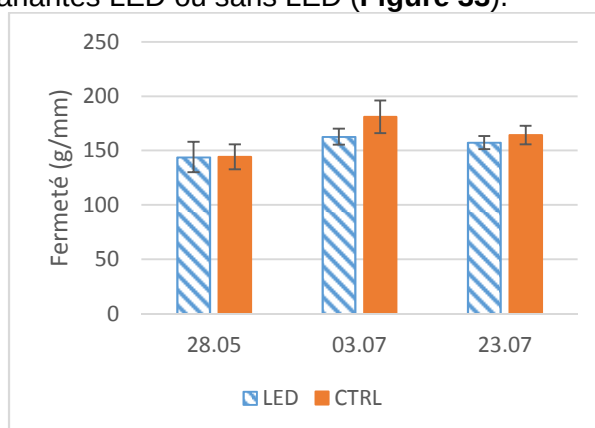


Figure 33 : Fermeté des fraises au cours de la saison. Les différences significatives entre les fraisières LED et les fraisières CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

a) Composés aromatiques

La recherche des composés aromatique par GC-MS permet de séparer les molécules volatiles présentes dans les échantillons et d'ensuite de mesurer leur masse sous forme ionique. Cette méthode permet d'obtenir des chromatogrammes dont les aires des pics sont proportionnelles à la concentration des molécules. Grâce aux spectres de fragmentation des ions obtenus, il est possible de définir la structure chimique des molécules aromatiques de l'échantillon (identification potentielle). La GC-MS a permis de détecter plus de 600 composés aromatiques. Parmi eux, environ 150 composés ont été identifiés comme ayant des teneurs significativement différentes entre les fraises LED et les fraises CTRL. Enfin, les ratios entre les teneurs en composés aromatiques des fraises LED et CTRL ont été calculées pour effectuer une sélection des composés marquant les plus grandes différences de teneurs entre les deux variantes LED ou CTRL. La **Figure 34** présente les molécules sélectionnées.

L'identification des molécules suivant la base NIST n'est qu'une identification potentielle mais donne déjà une idée des types de composés qui pourraient apparaître de

façon différenciée dans les fraises LED et les fraises CTRL. Ainsi, on constate que la présence de LED pourrait modifier l'arôme des fraises dans la mesure où l'on trouve certains composés en proportion différente dans les fraises LED et les fraises CTRL. La mesure a été effectuée sur des fraises ayant été récoltées à deux dates différentes (une récolte au mois de mai et une récolte au mois de juin) et les différences sont plus souvent significatives dans les fraises récoltées au mois de mai où l'apport de lumière artificielle était plus important (intensité de la lumière naturelle plus faible).

Enfin, si l'on s'intéresse à la nature des composés identifiés comme différenciateur au niveau de l'arôme entre les fraises LED et les fraises CTRL, on constate que ce sont essentiellement des esters. On trouve notamment dans les fraises du *decyl ester butanoic acid* en quantité plus importante dans les fraises. Ce composé est décrit comme un composé donnant une saveur fruitée de même pour le *methyl caproate* qui se trouve en quantité plus importante dans les fraises LED du mois de juin. Cependant, certains composés comme le *methyl thioacetate* se trouvent en plus grande quantité dans les fraises CTRL cette fois-ci. Ce composé serait plutôt associé à un arôme de fruit trop mûr ou encore à une odeur de fromage [6].

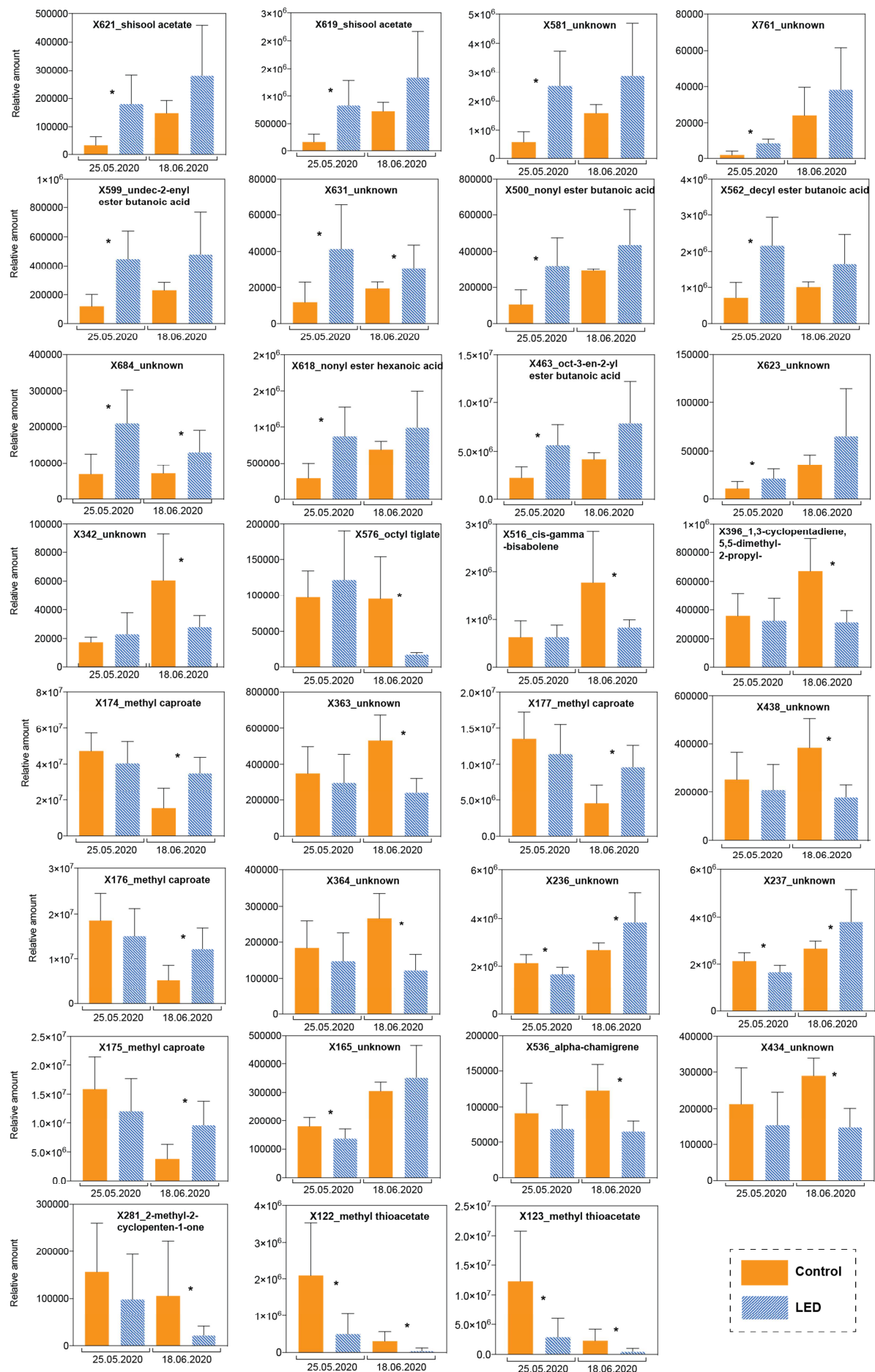


Figure 34 : Teneur relative des composés marquant les plus grandes différences significatives dans les arômes des fraises de deux récoltes (mois de mai et mois de juin. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon

3. Consommation électrique

Les LED des fraises étant reliées à un régulateur automatique, nous nous attendions à ce que la consommation électrique suive une croissance proportionnelle à la différence entre les rendements des fraises LED et des fraises CTRL et donc aussi à la durée du jour. Comme le montre la **Figure 35**, le taux d'accroissement de chacune des portions (pente) de la courbe est donné juste au-dessus de la courbe et montre que la consommation électrique n'est pas strictement linéaire. Il est cependant difficile de voir une quelconque corrélation entre la consommation électrique et les différences de rendement entre les fraises LED et CTRL. Pour les 16 lampes installées, la consommation électrique sur un peu plus de 14 semaines (du 05.05.2020 au 12.08.2020) est de 1232 kWh. Or, nous avons précédemment calculé que le rendement supplémentaire en fraises LED était de 7 kg. La fraise étant vendue en moyenne 6 CHF/kg sur la saison, on peut considérer que les LED ont permis de gagner environ 50 CHF en plus. Or le prix de l'électricité est d'environ 20 ct/kWh donc, la consommation électrique des LED a environ coûté 246 CHF. L'apport du rendement supplémentaire des fruits sous LED ne couvre donc pas le prix de la consommation électrique des LED sur la période étudiée.

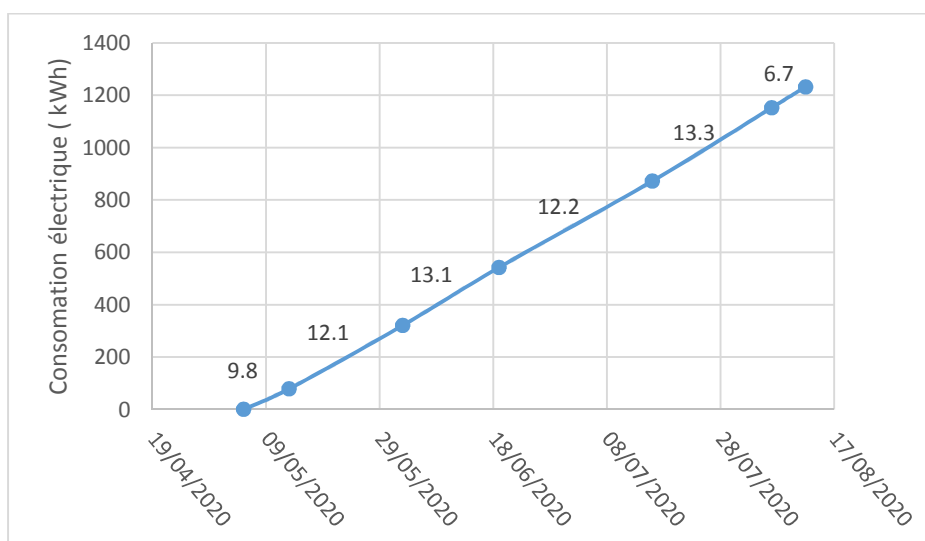


Figure 35 : Consommation électrique au cours de la saison de l'ensemble des lampes LED installées dans la serre de l'essai de fraises.

B. Framboise

1. Photosynthèse et rendement

a) Rendement

Tout comme pour l'étude du rendement des fraises, les framboises récoltées ont été triées suivant leur calibre et leur capacité à se maintenir en un fruit sans s'émietter en plusieurs grains. La **Figure 36** présente le rendement cumulé des fruits de premier choix. Il semble à première vue que les rendements des framboises LED soient plus importants que ceux des framboises CTRL car les framboisiers CTRL ont produit environ 595 g par cannes au 05 août et les framboisiers LED ont produit environ 615 g. Soit environ 7140 g de framboises CTRL contre 7385g framboises LED sur l'ensemble de l'essai. Ceci n'est cependant pas confirmé par les tests statistiques. La différence semble donc moins marquée que pour l'essai avec fraise.

Les rendements en fruit de second choix semblent être plus importants sans différence significative **Figure 37** et la part en fruit de second choix par rapport aux fruits de premiers choix semblent aussi plus importantes pour les framboises LED que pour les framboises CTRL **Figure 38**. Ainsi, les LED semblent permettre des rendements en fruits de premiers choix plus avantageux mais la part plus importante en fruits de second choix pourrait limiter cet avantage car les fruits de second choix sont moins valorisables par le producteur. Enfin, la taille des fruits ne semble pas impactée par la présence de LED.

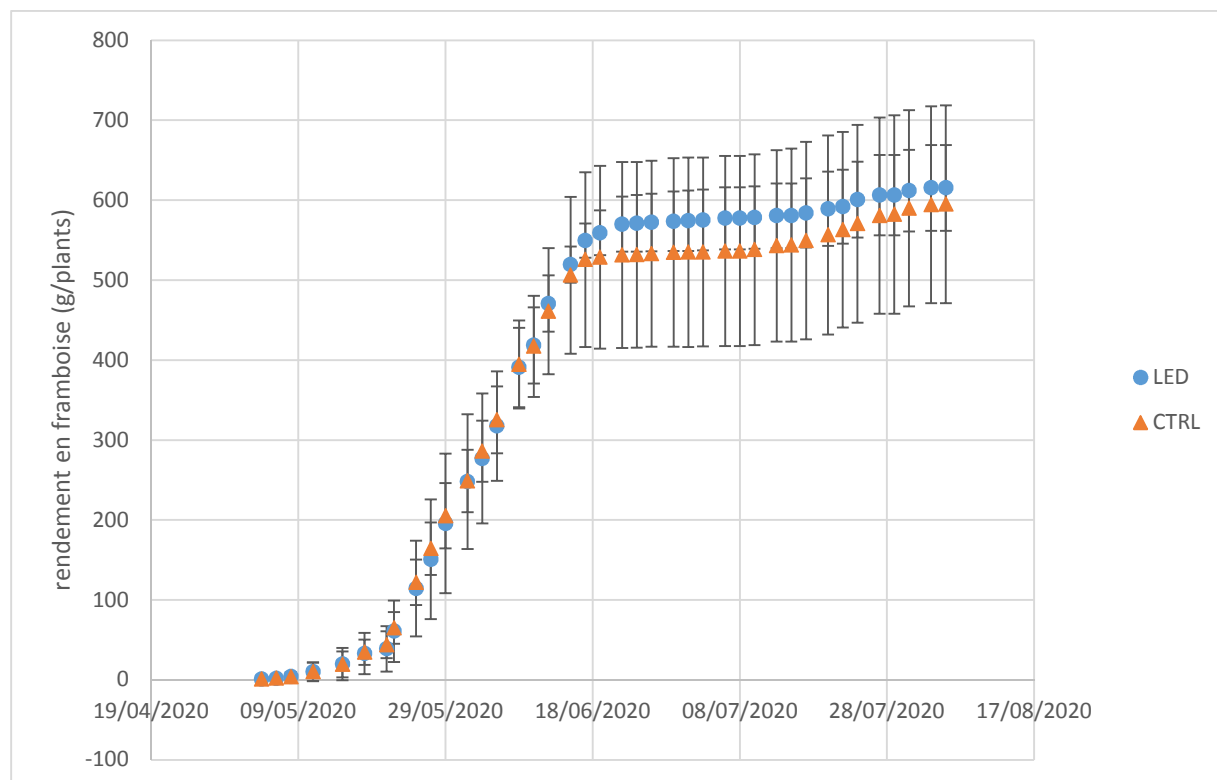


Figure 36 : Rendement cumulé de framboises de premier choix par cannes de framboisier au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboisiers LED et les framboisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p -value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p -value inférieure à 0.01 et *** une p -value inférieure à 0.001.

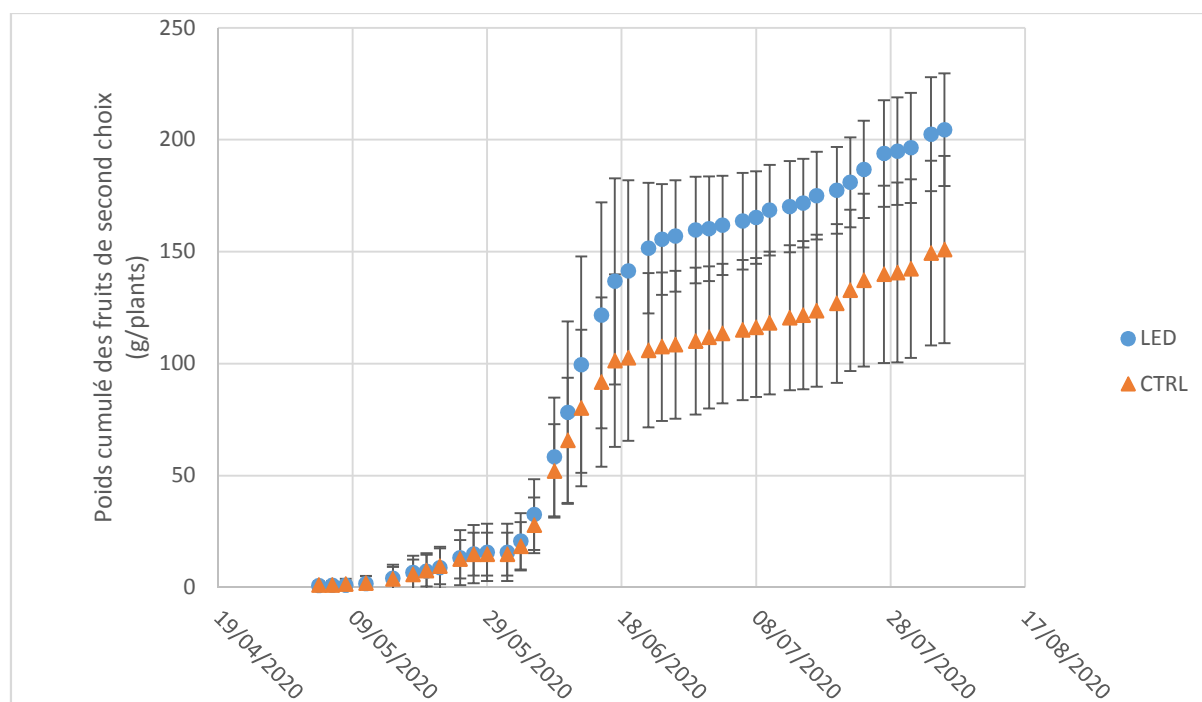


Figure 37 : Poids cumulé en framboises de second choix par cannes de framboisier au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboisiers LED et les framboisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

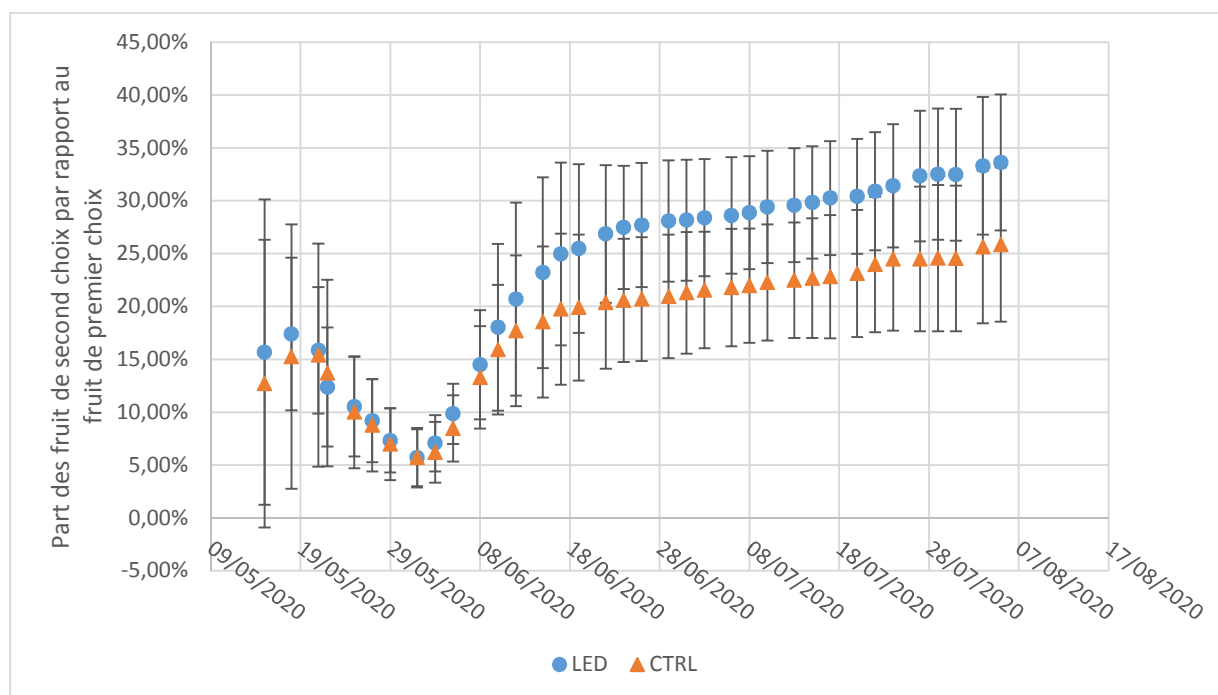


Figure 38 : Part des framboises de second choix par rapport aux framboises de premier choix. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

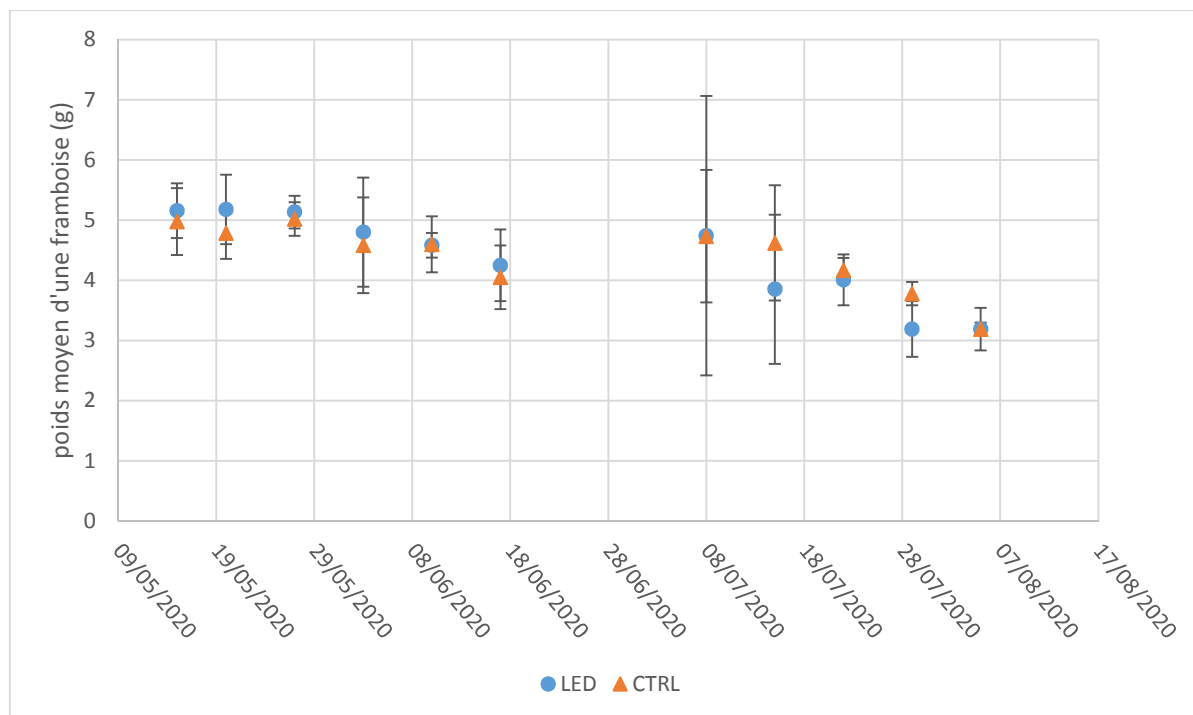


Figure 39 : Poids moyen d'une framboise de premier choix au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

b) Photosynthèse et échange gazeux au sein de la plante

De la même façon que dans l'essai avec les fraises, les mesures d'échanges gazeux et d'évapotranspiration effectuées sur les plants de framboise de permettent pas de mettre en avant une influence des LED sur la photosynthèse. En effet les évapotranspirations des framboises LED et framboises CTRL sont similaires (**Figure 40**) et les échanges en CO₂ sont également similaires (**Figure 41**).

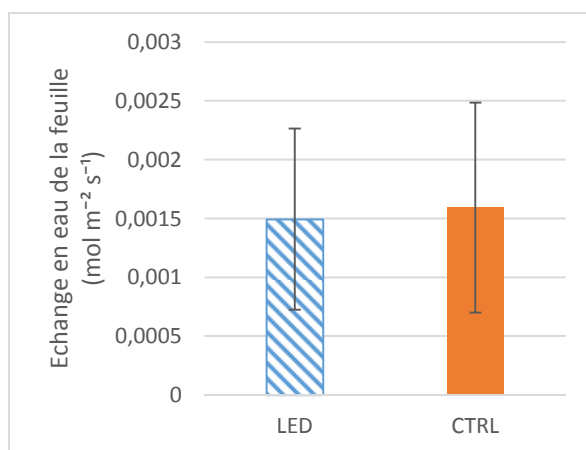


Figure 40 : Evapotranspiration des feuilles de framboisier. Les différences significatives entre les framboisiers LED et les framboisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

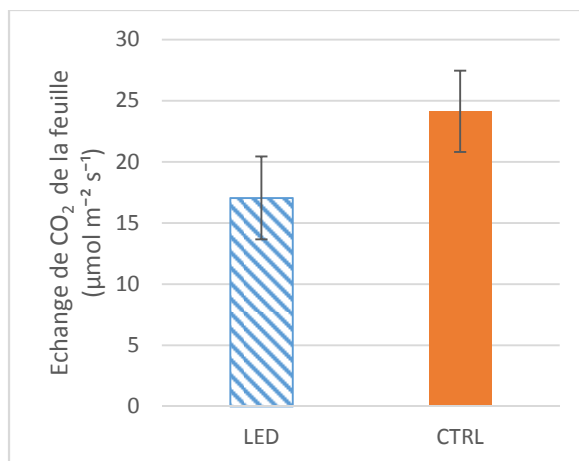


Figure 41 : Photosynthèse mesurée en absorption de CO₂ par la feuille de framboisier. Les différences significatives entre les fraisiers LED et les fraisiers CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

2. Qualité du fruit

a) Antioxydants

L'étude des antioxydants sur les framboises a été effectuée comme pour les fraises avec le réactif de Folin et au DPPH. Le test au réactif de Folin (**Figure 42**) ne met en avant aucune différence de teneur en polyphénols totaux. La quantité de polyphénol ne semble pas être modifiée par la présence de LED pour la production de framboises. Cependant, le test au DPPH (**Figure 43**) présente une légère différence dans les teneurs en antioxydants entre les framboises LED et les framboise CTRL en faveur des framboises LED.

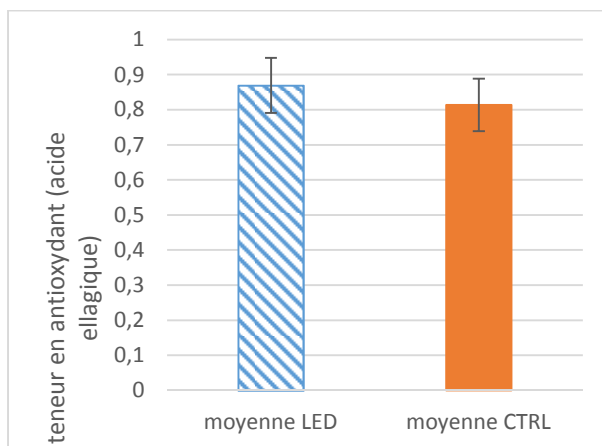


Figure 42 : Teneur en polyphénols totaux sur des framboises du mois de mai mesurée avec le réactif de Folin. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

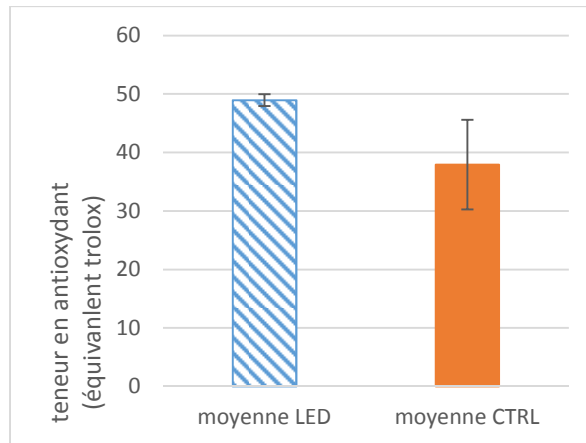


Figure 43 : Teneur en composés antioxydants sur des framboises du mois de mai mesuré avec du DPPH. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

b) Sucre et acidité

De même que pour la teneur en sucre des fraises, les mesures effectuées sur les framboises montrent une similarité des framboises LED et des framboises CTRL pour cette variable (**Figure 44**). Cependant la mesure de l'acidité semble mettre en avant une acidité accrue pour les framboises LED (**Figure 45**). Notons que la différence entre l'acidité des framboises LED et des framboises CTRL n'est pas significative dans la mesure où la p-value nécessaire pour considérer une différence significative a été fixée inférieure à 0.05 mais dans ce cas la p-value étant égale à 0.057 pour les deux dates de récolte, l'acidité semble quand même être augmentée par la présence de LED.

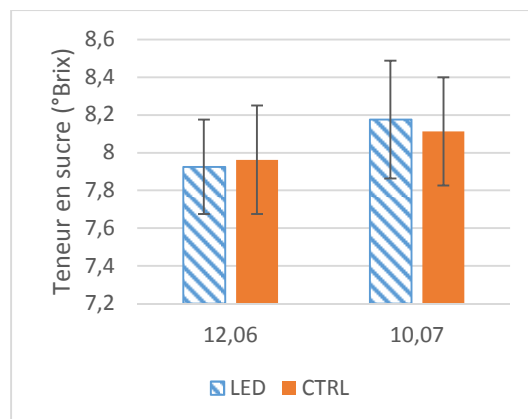


Figure 44 : Teneur en sucre (saccharose) sur les framboises au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

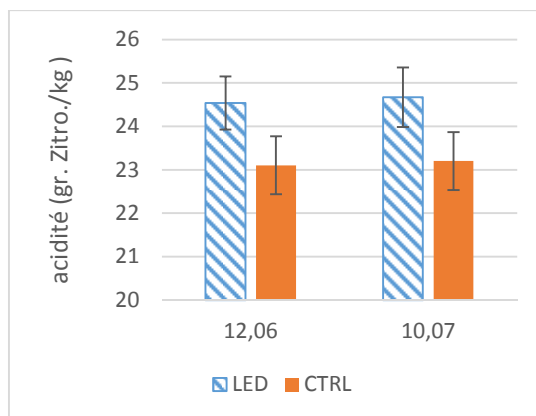


Figure 45 : Acidité des framboises au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

c) Fermeté

Concernant la fermeté des framboises, elle ne semble pas du tout être influencée par la présence de LED (**Figure 46**).

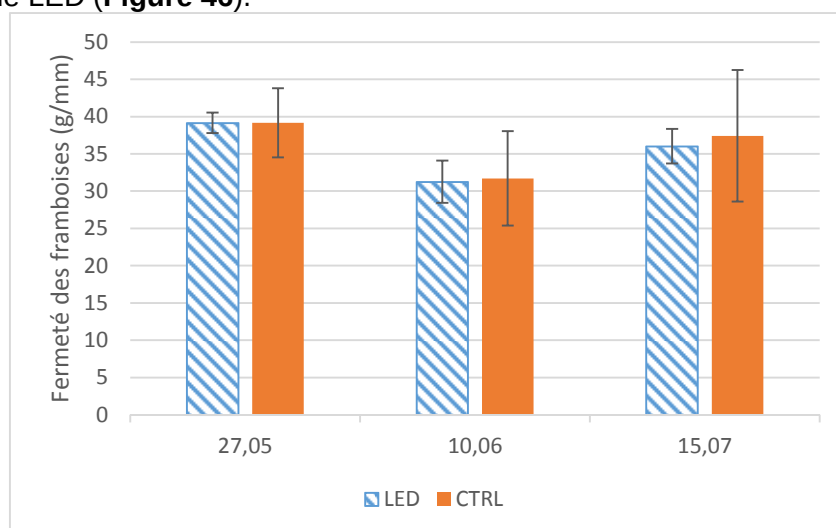


Figure 46 : Fermeté des framboises au cours de la saison. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un p-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une p-value inférieure à 0.01 et *** une p-value inférieure à 0.001.

d) Composés aromatiques

L'analyse des composés aromatiques n'a été effectuée que sur des framboises de la récolte du mois de mai pour des raisons de disponibilité en fruit au moins de juin. Les différences aromatiques semblent moins marquées sur les framboises que sur les fraises. Plus de 500 composés aromatiques ont été détectés dans les framboises. Seulement 20 composés montrent une teneur significativement différente entre les framboises LED et les framboises CTRL. Ainsi, il n'a pas été nécessaire de faire une sélection des composés comme pour fraises car moins de composés admettent des proportions significativement différentes entre les framboises LED et les framboises CTRL (**Figure 47**). Parmi les composés identifiés, on retrouve à nouveau des esters comme le 4-hexen-1-ol acétate mais aussi des alcools comme le *linalool* qui dégage une odeur florale, des cétones comme le *2-heptanone* aux arômes de fromage plus présent dans les framboises CTRL que dans les framboises LED ou la *gamma*

decalactone qui dégage un arôme fruité et sucré. Enfin la concentration de terpènes comme l'*alpha* terpinène qui dégage un arôme boisé ou citronné est plus faible sous les LED [6]. Les composés dont la concentration est impactée de manière significative par la présence de LED sont majoritairement moins concentrés sous LED.

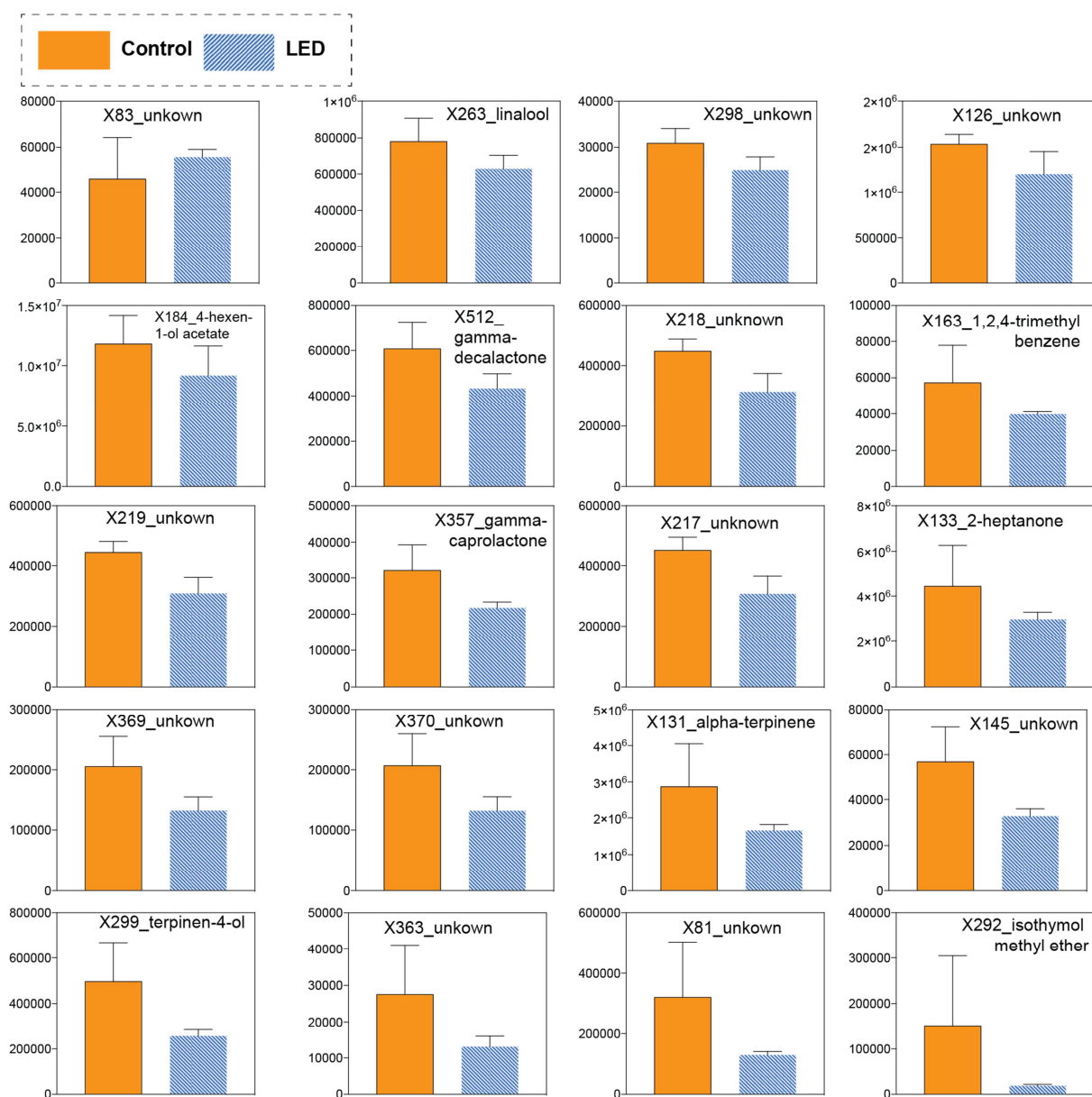


Figure 47 : Teneur relatives en composés aromatiques dans les framboises. Les différences significatives entre les framboises LED et les framboises CTRL sont données par la légende suivante : * donne des valeurs significative avec un *p*-value inférieure à 0.05 au test de Wilcoxon, ** une *p*-value inférieure à 0.01 et *** une *p*-value inférieure à 0.001.

3. Consommation électrique

La consommation électrique cumulée dans la serre de framboises au 12 aout est de 686 kWh (**Figure 48**). Sur l'ensemble de la saison, si nous considérons toujours un prix de l'électricité à 20 ct/kWh, cela fait un coût en électricité d'environ 137 CHF. Nous avons calculé dans la partie III.B.1.a) une différence d'environ 250g d'une valeur de moins de 10 CHF sur l'ensemble de la production de l'essai entre les framboises LED et les framboises CTRL. Ainsi, la différence de production ne permet pas du tout de rembourser la consommation électrique dans cet essai.

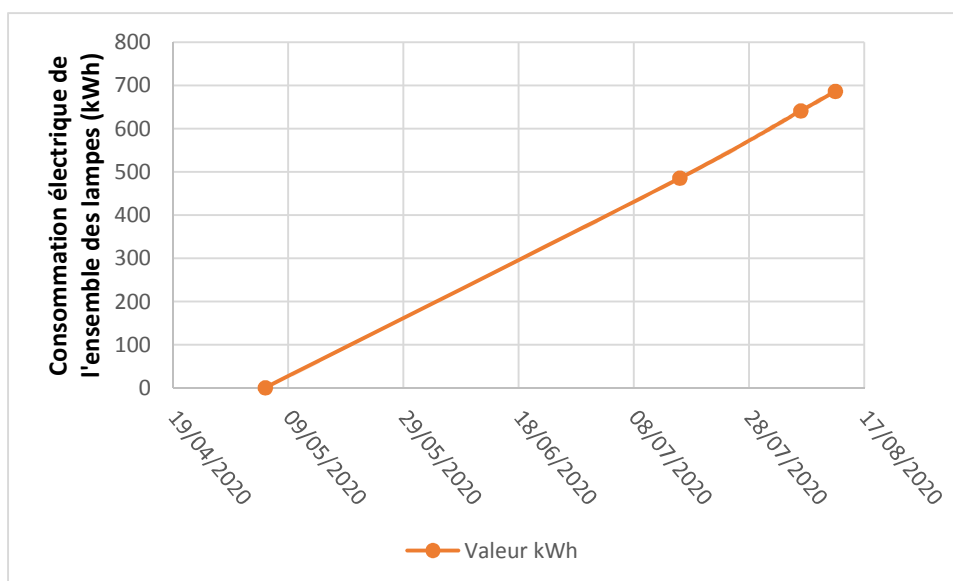


Figure 48 : Consommation électrique de l'ensemble des LED pour l'essai sur framboises

IV. DISCUSSION

A. Analyse des rendements

En premier lieu, nous avons pu constater que l'apport de lumière par les LED permet une augmentation des rendements cumulés sur l'ensemble de la saison. Cette différence apparaît comme statistiquement significative pour l'essai sur les fraises mais pas sur les framboises. Nous pouvons souligner que les LED ont été installées le 27 mars dans les serres de fraises et un mois plus tard dans les serres de framboises. Or, les framboises ont commencé à être récoltées le 4 mai tandis que les fraises le 12 mai. Le laps de temps entre l'installation des LED et le début de la récolte a donc été plus important sur l'essai des fraises que sur l'essai des framboises. De manière générale, les plants ne sont peut-être pas restés assez longtemps au contact de la lumière des LED avant la fructification pour que l'influence des LED sur la production de framboises n'apparaisse mais aussi, à moindre échelle, sur la production de fraises. S'ajoute à cela le fait que la période sur laquelle s'est déroulée l'étude (de mai à août) est une période où l'ensoleillement est maximal. De plus, la saison a été marquée par de très nombreux jours de soleil qui ne permettent peut-être pas de marquer véritablement un contraste de rendement important entre la production sous LED et la production CTRL. Pour une analyse plus précise de la quantité de lumière reçue par les plantes, une mesure en continue de l'intensité lumineuse reçue par les plants LED et les plants CTRL auraient pu permettre de mieux comprendre d'éventuelles différences entre les deux modalités.

Enfin, au mois de juin, une partie des plants de fraises ont subi un dépérissement ayant perturbé la production. Sans cet incident, le rendement aurait peut-être pu être plus important et montrer de façon encore plus marquée l'influence de l'éclairage LED sur le rendement. Cependant l'essai continue pour la période automnale et nous attendons des différences plus marquées à cette période.

B. Analyse de la photosynthèse

L'analyse de la photosynthèse n'a pas permis de mettre en avant une activité photosynthétique changée par la présence des LED. Pour l'analyse de la photosynthèse, les paramètres de lumière injectée et de CO₂ ont été choisis de manière à ce que la photosynthèse soit la plus importante possible dans les feuilles mesurées. Nous aurions pu nous attendre à ce que les feuilles ayant été exposées à une lumière plus intense (sous les LED) aient une activité photosynthétique plus importante en condition idéale pour une

photosynthèse maximale ou au contraire moins importante si les feuilles s'étaient adaptées à une intensité lumineuse importante permettant une photosynthèse maximale tout au long de la journée. Dans cet essai, nous avons seulement prolongé la photopériode et non l'intensité lumineuse maximale reçue par les plantes. En effet, l'intensité de la lumière naturelle est deux à trois fois plus importante ($1000-1500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) que celle fournie par les LED. C'est donc probablement la lumière naturelle qui définit la capacité maximale de photosynthèse des feuilles (paramètre mesuré dans cette étude) et non l'ajout de lumière LED en début et fin de journée. Ainsi, nous n'observons pas de différences entre les deux variantes. Des différences de photosynthèse maximale pourraient être observées dans des conditions sans lumière naturelle avec deux intensités lumineuses différentes.

Afin de pouvoir mesurer des différences plus fines au niveau de l'activité photosynthétique, nous aurions aussi éventuellement pu faire des mesures en fonction de variation lumineuse et de CO_2 .

C. Etude des maladies et ravageurs

Dans cet essai, seuls les thrips ont été étudiés ce qui ne constitue qu'une étude des ravageurs mais un suivi de l'oïdium pourra être réalisé lorsque la pression sera plus forte.

D. Analyse de la qualité des fruits

Nous n'observons aucune différence entre les fruits CTRL et les fruits LED concernant la qualité des fruits à part sur les teneurs en composés aromatiques. Ainsi, les LED ne semblent pas impacter négativement la production d'après les paramètres étudiés.

L'analyse des composés aromatiques a pu mettre en avant une influence des LED sur l'arôme des fraises et des framboises. Cette analyse vient en complément des analyses de sucre, d'acidité et d'antioxydant qui concernent le goût et la qualité du fruit et qui ne montraient pas d'influence majeure des LED sur la qualité des fruits.

Certains composés ont pu être identifiés mais notons que l'identification se base sur la base de données NIST et ne constitue pas un élément parfaitement fiable. Cette première étude des composés aromatiques et les quelques identifications qui ont pu être faites, permettent pour l'instant de dire que l'arôme des fraises et des framboises LED admettent des différences avec l'arôme des fraises et des framboises CTRL mais le goût du fruit ne semble pas altéré si l'on en croit les premières identifications potentielles, il pourrait même être amélioré avec des arômes soufrés atténués et des arômes fruités favorisés dans le cas des fraises du mois de mai.

Pour les fraises, les différences étaient plus marquées au mois de mai entre les fraises LED et les fraises CTRL. Cela peut s'expliquer par le fait que la lumière naturelle était moins importante au moins de mai qu'au moins de juin car les jours étaient plus courts et ainsi les plants LED étaient proportionnellement plus éclairés par les LED au mois de mai qu'au mois de juin.

E. Etude de la consommation électrique

Comme les lampes utilisées pour les fraises disposent d'un régulateur, nous nous attendions à ne pas avoir une consommation électrique linéaire comme en framboises. Cependant, la consommation électrique ne suit pas une courbe corrélée aux rendements. Les lampes consomment probablement encore beaucoup même si l'intensité est abaissée lorsqu'une lumière importante n'est pas nécessaire. Cet élément pourrait être mesuré avec un compteur instantané afin de suivre en direct la consommation électrique parallèlement à un suivi de l'intensité lumineuse.

Pour les fraises comme pour les framboises, l'augmentation de rendement induit par les LED pendant la période étudiée ne couvre pas les coûts induits par la consommation électrique des lampes. De plus, pour être viable, l'augmentation de rendement doit permettre de pourvoir amortir l'investissement important généré par les lampes, qui se montent à plusieurs centaines de milliers de CHF par hectares.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Concernant ce projet, l'analyse de l'influence des LED sur la période estivale est terminée mais nous attendons désormais de mesurer l'impact de l'éclairage LED à l'automne avec des jours plus courts et un ensoleillement plus faible. L'essai est donc laissé en place pour cette suite de l'étude et un nouvel essai avec d'autres types de lampes sera également mis en place. Pour l'étude des framboises sous LED, il est prévu de lancer des essais similaires mais avec d'autres variétés.

Les résultats de l'étude sur fraises ou sur framboises sont prometteurs sur plusieurs aspects. En effet, les rendements semblent augmentés par la présence des LED. Les analyses de fermeté, sucre, acidité et teneur en composés antioxydants révèlent une qualité similaire entre les fraises et framboises. L'acidité et la teneur en composés antioxydants semblent plus importantes sur les framboises ayant été cultivées sous LED mais ces différences ne sont pas statistiquement significatives. Cependant, l'arôme des fraises et des framboises semblent influencé par la présence de LED car nous avons pu mettre en évidence des variations dans les profils aromatiques. Il reste à démontrer que les différences mesurées par GC-MS ont un impact sur l'arôme de ces petits fruits ressenti par l'humain. Ceci pourra être effectué avec des tests de dégustation d'un panel de consommateurs. Il est aussi possible au centre Agroscope de Liebefeld, où les analyses GC-MS ont été menées, de connecter l'appareil de GC-MS à une chambre isolée avec une arrivée olfactive dans laquelle des personnes entraînées à la reconnaissance des molécules par leur odeur peuvent identifier les composés des échantillons. Cette technologie peut permettre de renforcer les connaissances sur l'impact aromatique des composés identifiés.

Il est primordial de continuer à mesurer ces paramètres de rendement et de qualité en automne où les différences seront certainement plus prononcées. De plus, un marketing spécifique pour les petits fruits ayant été cultivés sous LED pourra être réalisé sous la dénomination d'une qualité supérieure de fruits suisses hors saison. Une culture sous éclairage LED à l'automne pourra être pertinente dans la mesure où les variantes CTRL vont commencer à manquer de lumière et être, par exemple, moins sucrées. Ainsi, l'ajout de LED pourrait devenir économiquement viable contrairement aux premiers essais en pleine saison. Afin d'être rentable, l'augmentation du rendement, et potentiellement de la qualité, doit permettre de couvrir la consommation électrique et également l'amortissement de l'investissement important généré par les lampes (plusieurs centaines de CHF par hectare).

L'éclairage LED est aussi reconnu pour donner la possibilité d'avoir un spectre lumineux assez précis en fonction des puces LED utilisées. Cet aspect des LED n'a pas été exploité dans cette étude mais la réaction à la lumière des fraises et des framboises étant différentes d'une variété à l'autre (variété remontante ou non par exemple). Nous pouvons imaginer que l'étude des spectres les plus adaptés par la comparaison de différents spectres de lumière suivant les variétés et les espèces pourraient constituer un avantage déterminant pour la production de fraises et framboises sous éclairage LED.

Le contexte de l'étude a été un peu particulier en cette année 2020 dû à la crise du coronavirus. En effet, il n'était pas prévu, au début, de traiter le sujet de l'éclairage LED sur framboises avec un essai dans le centre Agroscope de Conthey mais plutôt chez un producteur. La mise en place de l'essai sur framboises a été rendu possible par l'implication des membres du groupe baies et l'introduction de lampes sur les parcelles dédiées à des essais variétaux. L'essai aurait ainsi pu être mis en place plus tôt avec une plantation plus tôt dans l'année pour voir l'impact de l'éclairage LED au printemps. Il manque aussi une évaluation d'échantillon dans des exploitations à des échelles plus grandes et un contact direct avec des producteurs avec lesquels il était prévu au départ d'avoir un essai chauffé. Or, la lumière étant souvent associée à des paramètres de température, il pourrait être intéressant à l'avenir de pouvoir combiner un effet de la lumière avec celui d'une température plus importante pour éventuellement favoriser des productions plus précoces et un étalement des pics de production sur la saison.

Enfin, une étude ponctuelle de la présence de thrips a été effectuée sur l'essai de fraises mais le sujet des maladies et ravageurs pourrait être plus poussé car la bibliographie actuelle ne l'évoque pas encore. Or, il est important dans un contexte de réduction des produits phytosanitaire de s'attarder sur l'influence que pourraient avoir les LED sur la présence de maladie et ravageurs. Cette première étude sera complétée dès l'automne par un suivi de l'oïdium lorsque la pression sera plus forte.

BIBLIOGRAPHIE

- AGROSCOPE, Ançay, A., Carlen, C., (2015) Production de framboises sur substrat : Choix du volume du pot et du type de substrat. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, Vol. 47 (6): 364–370, Consulté 13 mars 2020, à l'adresse <https://docplayer.fr/68931430-Production-de-framboises-sur-substrat-choix-du-volume-du-pot-et-du-type-de-substrat.html>
- Aprea, E., Biasioli, F., & Gasperi, F. (2015). Volatile compounds of raspberry fruit : From analytical methods to biological role and sensory impact. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 20(2), 2445–2474. Consulté le 25 juillet 2020, à l'adresse <https://doi.org/10.3390/molecules20022445>
- Batista, D. S., Felipe, S. H. S., Silva, T. D., et al. (2018). Light quality in plant tissue culture : Does it matter? *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 54(3), 195–215. Consulté le 02 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9902-5>
- Boizot, N., & Charpentier, J.-P. (2006). Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 79-82. (2006). Consulté le 25 juillet 2020 à l'adresse <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR2016203001>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. Consulté le 24 juillet 2020 à l'adresse [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Carew, J., et al. (2000) The control of the annual growth cycle in raspberry. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. Consulté le 03 août 2020, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/289714572_The_control_of_the_annual_growth_cycle_in_raspberry
- Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne (2016), *Variété de fraise—MURANO - Fiche 2016—Lot-et-Garonne*. Consulté le 25 juillet 2020 à l'adresse <https://lot-et-garonne.chambre-agriculture.fr/publications/toutes-les-publications/la-publication-en-detail/actualites/variete-de-fraise-murano-fiche-2016-lot-et-garonne/>
- Choi, H. G., Moon, B. Y., & Kang, N. J. (2015). Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. *Scientia Horticulturae*, 189, 22–31. Consulté le 16 mars 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.022>
- Darnell, R., Brunner, B., Alvarado-Raya, H., Williamson, J., Plaza, M., & Negrón, E. (2006). Annual, Off-season Raspberry Production in Warm Season Climates. *HortTechnology*, 16, 92–97. Consulté le 17 juin 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.16.1.0092>
- Darnell, R., Cantliffe, D., Kirschbaum, D., & Chandler, C. (2003). The Physiology of Flowering in Strawberry. In *Hort. Rev.* (Vol. 28, p. 325–349). Consulté le 13 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1002/9780470650851.ch6>
- Fisher, P., (2004) Les maladies des petits fruits et les stratégies de lutte, *Petits fruits—Agri-Réseau , Conférence présentée à l'occasion des journées AGRIVISION MONTEGERIE*. Consulté 13 juillet 2020 à l'adresse <https://www.agrireseau.net/petitsfruits/documents/61461/les-maladies-des-petits-fruits-et-les-strategies-de-lutte>
- Fuchsmann, P., Tena Stern, M., Bischoff, P., Badertscher, R., Breme, K., & Walther, B. (2019). Development and performance evaluation of a novel dynamic headspace vacuum transfer “In Trap” extraction method for volatile compounds and comparison with headspace solid-phase microextraction and headspace in-tube extraction. *Journal of Chromatography A*, 1601, 60–70. Consulté le 20 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.05.016>

- FUNT Richard C., HALL Harvey K. (2013). Raspberry Librairie Lavoisier. Consulté le 3 juillet 2020 à l'adresse https://www.lavoisier.fr/livre/agriculture/raspberries/funt/descriptif_2658816
- GASTON A., 2010 Etude et compréhension du déterminisme génétique et moléculaire de la remontée florale chez le fraisier . Thèse de doctorat Université de Bordeaux Consulté le 27 avril 2020 à l'adresse https://belinra.inra.fr/doc_num.php?explnum_id=486
- Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J., The strawberry : Composition, nutritional quality, and impact on human health. (2012). *Nutrition*, Vol 28(1), p 9-19. Consulté le 30 mars 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>
- Hanenbergh, M. A. A., Janse, J., & Verkerke, W. (2016). LED light to improve strawberry flavour, quality and production. *Acta Horticulturae*, 207-212. Consulté le 15 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1137.29>
- Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., Kitano, M., & Okimura, M. (2013). Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environmental Control in Biology*, 51(1), 41-47. Consulté le 10 avril 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.2525/ecb.51.41>
- Hummer, K. E., & Hancock, J. (2009). Strawberry Genomics : Botanical History, Cultivation, Traditional Breeding, and New Technologies. In K. M. Folta & S. E. Gardiner (Éds.), *Genetics and Genomics of Rosaceae* (p. 413-435). Springer. Consulté le 25 juillet à l'adresse https://doi.org/10.1007/978-0-387-77491-6_20
- INVENIO Pascaud, F., Thiery, F., (2015) Synthèse bibliographique - Eclairage photosynthétique Hummer, Culture de fraise hors-sol : maîtriser l'itinéraire technique et l'impact environnemental Compte-rendu d'essai
- Kouchkovsky, Y. de. (1983). Les mécanismes fondamentaux de la photosynthèse. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 130(1), 19-41. Consulté le 10 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1080/01811789.1983.10826588>
- Larsen, M., Poll, L., & Olsen, C. E. (1992). Evaluation of the aroma composition of some strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) cultivars by use of odour threshold values. *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung Und Forschung*, 195(6), 536-539. Consulté le 26 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1007/BF01204558>
- Li, Y., Chen, H., Ji, H., Wang, S., Zhu, Z., & Wang, X. (2012). Effect of LED Supplemental Illumination on the Growth of Strawberry Plants. *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, 1-4. Consulté le 27 mars 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1109/SOPO.2012.6270919>
- Nestby, R., & Trandem, N. (2013). Supplemental LED growth light in remontant strawberry at high latitudes. *Journal of Berry Research*, 3(4), 217-226. Consulté le 25 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.3233/JBR-130060>
- Niangoran, U., Buso, D., CANALE, L., & Zissis, G. (2020). Eclairage horticole : Pourquoi choisir la technologie LED ? *REE - Revue de l'électricité électronique*, 2020(1), 62-68.
- OFAG, (2017) Les petits fruits une tendance qui ne se dément pas, Bulletin du marché du secteur agroalimentaire , 3^e trimestre 2017 Consulté le 15 juillet 2020 à l'adresse : https://www.blw.admin.ch/dam/blw/fr/dokumente/Markt/Marktbeobachtung/Land-%20und%20Ernaehrungswirtschaft/Marktberichte/MBLE_2017Q3.pdf.download.pdf/MBLE_2017Q3_f.pdf
- OIELFP (1998) RS 916.121.10 Ordonnance du 7 décembre 1998 sur l'importation et l'exportation de légumes, de fruits et de plantes horticoles. Consulté 25 juillet 2020 à l'adresse <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19983424/index.html>
- Pineli, L. de L. de O., Moretti, C. L., dos Santos, M. S., Campos, A. B., Brasileiro, A. V., Córdova, A. C., & Chiarello, M. D. (2011). Antioxidants and other chemical and physical characteristics of two strawberry cultivars at different ripeness stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 11-16. Consulté le 20 avril 2002 à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.05.004>

- Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. (2015). LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 139-147. Consulté le 13 mars à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>
- SwissFruit (2017) Directives pour la culture de fraises et Directives pour la culture de framboises In : Guides des petits fruits 2017 FUS/ Swiss fruit p10-30
- Törrönen, R., & Määtä, K. (2002). BIOACTIVE SUBSTANCES AND HEALTH BENEFITS OF STRAWBERRIES. *Acta Horticulturae*, 567, 797-803. Consulté le 05 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.176>
- Yan, J., Ban, Z., Lu, H., Li, D., Poverenov, E., Luo, Z., & Li, L. (2018). The aroma volatile repertoire in strawberry fruit : A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(12), 4395-4402. Consulté le 26 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1002/jsfa.9039>
- Yeh, N., & Chung, J.-P. (2009). High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2175-2180. Consulté le 25 mars 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.027>
- Zahedi, S. M., & Sarikhani, H. (2017). The effect of end of day far-red light on regulating flowering of short-day strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch. Cv. Paros) in a long-day situation. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64(1), 83-90. Consulté le 16 juillet 2020 à l'adresse <https://doi.org/10.1134/S1021443717010198>

SITOGRAFIE

- [1] <https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-28041-description>
- [2] <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>
- [3] <http://www.aprifel.com/>
- [4] <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Marche/ramboise.htm>
- [5] <https://www.cours-pharmacie.com/biologie-vegetale/la-photosynthese.html>
- [6] <http://www.thegoodscentscompany.com/data/rw1083071.html>

 		Diplôme : Ingénieur Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Ingénierie des Productions et des Produits de l'Horticulture (I2PH) Enseignant référent : Mathilde BRIARD	
Auteur(s) : Tiphaine Chambreuil Date de naissance* : 12/07/1997		Organisme d'accueil : Agroscope Adresse : Route des Eterpys, 18 1964 Conthey Suisse	
Nb pages : Annexe(s) :		Maître de stage : Bastien CHRIST	
Année de soutenance : 2020			
Titre français : Etude de l'influence de la lumière LED sur la production de fraises et de framboises en culture hors-sol Titre anglais : Study of the influence of LED light on the production of strawberries and raspberries in soilless cultivation			
Résumé (1600 caractères maximum) : En Suisse, la fraise et la framboise sont très appréciées par les consommateurs. Cependant, la production traditionnelle de fraises et de framboises est soumise à plusieurs contraintes. L'un des défis les plus importants pour les producteurs est d'atténuer les pics de production en été pour avoir une production mieux répartie au cours du temps. Actuellement, pour atténuer ces pics, des variétés dites remontantes sont utilisées et les surfaces de productions sur substrats et sous abris augmentent. Jusqu'alors, l'ajout de lumière artificielle est peu utilisé en production en Suisse pour des raisons de coûts dus à la consommation électrique. Nous nous proposons donc dans cette étude de voir en quoi l'ajout de lumière LED peut permettre une amélioration de la production en termes de rentabilité et de qualité des fruits en augmentant la durée de l'éclairage quotidien le matin et le soir. L'étude montre une amélioration des rendements sous lumière LED avec une différence plus marquée sur fraises que sur framboises. La qualité des fruits reste similaire avec une production sous LED. Seuls les teneurs en composés aromatiques semblent changer avec une production sous LED. D'après l'étude de la consommation électrique et des rendements, l'utilisation de lumière LED n'est pas rentable en conditions estivales. Le prolongement de l'étude en saison automnale permettra de mettre en avant un plus grand intérêt de la lumière LED sur une saison avec un éclairage naturel moins important.			
Abstract (1600 caractères maximum) : In Switzerland, strawberries and raspberries are very popular. However, the traditional production of strawberries and raspberries is subject to several constraints. One of the most important challenges for growers is to mitigate production peaks in summer in order to have a more evenly distributed production over time. Currently, to mitigate these peaks, so-called remontant varieties are being used and the area of production on substrates and under shelter is increasing. Until now, the addition of artificial light has been little used in production in Switzerland for reasons of cost due to electricity consumption. In this study, we therefore propose to examine how the addition of LED light can improve production in terms of profitability and fruit quality by increasing the duration of daily lighting in the morning and evening. The study shows an improvement in yields under LED light with a greater difference on strawberries than on raspberries. The quality of the fruit remains similar with production under LED light. Only the content of aromatic compounds seems to change with LED production. According to the study of power consumption and yields, the use of LED light is not profitable in summer conditions. The continuation of the study into the autumn season will make it possible to highlight the greater interest of LED light over a season with less natural illumination.			
Mots-clés : lumière LED ; <i>Fragaria x annassa</i> ; <i>Rubus ideaus</i> ; rendement ; qualité des fruits Key Words: LED lighting ; <i>Fragaria x annassa</i> ; <i>Rubus ideaus</i> ; yeld ; fruit quality			

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