

2017-2018

Master 1 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie Végétale



EFFET DE SPECTRES LUMINEUX EMIS PAR ECLAIRAGE LED SUR LA PRODUCTION DE JEUNES PLANTS HORTICOLES EN ENVIRONNEMENT CONTROLE

Mise en place et suivi d'un essai préliminaire au projet Irradiance visant à mettre au point
un système innovant de production de plantes horticoles compactes et ramifiées
pour mieux répondre au marché urbain émergent

Lacotte Virginie |

Soutenu publiquement
le 04/07/2018

**Sous la direction de M. |
Stapel Oscar**

Membres du jury

Lothier Jérémie | Tuteur, Enseignant à l'Université d'Angers et Chercheur à l'IRHS en Physiologie Végétale

Gentilhomme José-Sabrina | Auditrice, Enseignante à l'Université d'Angers et Chercheuse à l'IRHS en Physiologie Végétale

Simier Philippe | Président, Enseignant-Chercheur à l'Université de Nantes en Physiologie et Pathologie Végétale

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

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

signé le **26 / 05 / 2018**



L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :



- Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- Vous n'avez pas le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter.

Consulter la licence creative commons complète en français :
<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/fr/>

Ces conditions d'utilisation (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification) sont symbolisées par les icônes positionnées en pied de page.



REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée à bien grâce au savoir exceptionnel et au soutien inconditionnel de l'équipe de la STEPP qui fait force d'un engagement dévoué au service de l'innovation de la filière horticole.

Tout d'abord, cet essai n'aurait jamais vu le jour sans l'initiative du Directeur de la STEPP, Oscar Stapel, qui, une fois n'est pas coutume, a su mobiliser ses propres moyens et aller au-delà des circonstances afin de satisfaire sa curiosité scientifique et « surfer sur la vague » de l'éclairage horticole en environnement contrôlé pour offrir dès aujourd'hui des solutions innovantes aux producteurs de la filière. Mr Stapel fait preuve d'une grande confiance envers son équipe et délègue des responsabilités non seulement aux employés de la STEPP, mais aussi aux stagiaires recrutés par ses soins. Cette ambiance de travail m'a donné l'occasion de développer ma motivation, mon autonomie, ma prise d'initiatives et ma créativité au sein de la station d'expérimentation. Ainsi, je remercie grandement Oscar Stapel pour m'avoir donné la chance de vivre une expérience professionnelle unique au sein de la STEPP suite à ma candidature spontanée pour intégrer la station d'expérimentation horticole de France la plus développée dans l'éclairage innovant des cultures. J'aimerais également lui exprimer ma gratitude pour le temps précieux qu'il m'a généreusement accordé et surtout le savoir qu'il m'a transmis dans le domaine complexe et si peu connu de l'éclairage artificiel des cultures complémentaire ou en source unique.

Ces écrits sont également une occasion d'exprimer toute ma reconnaissance envers Anne Pennaneac'h, ingénieure d'expérimentation à la STEPP, qui m'a épaulée et guidée au quotidien dans mon projet, quelles que soient les difficultés. J'ai appris énormément depuis le premier jour grâce à Mme Pennaneac'h qui a manifesté une remarquable pédagogie et une grande patience à mon égard. Faire la rencontre d'Anne Pennaneac'h est pour moi une source d'inspiration pour mon projet professionnel visant à apporter mon soutien et mes connaissances à la filière horticole au travers d'expérimentations en tant qu'ingénieure en horticulture ou en agriculture urbaine.

Je remercie également Justine Collec, technicienne d'expérimentation à la station, qui, comme à son habitude, m'a témoigné une grande écoute et une profonde attention et partage chaque jour avec moi sa grande expérience du métier, qui plus est dans la joie et la bonne humeur. En compagnie de Justine Collec, travailler perd sa signification première et devient telle une grande balade dans le monde passionnant de l'expérimentation horticole où l'on apprend et met en pratique continuellement de nouvelles techniques et astuces professionnelles.

Parce que nous avons besoin du soutien de chacun pour réaliser un travail à la hauteur de nos ambitions, je remercie chaleureusement les deux autres stagiaires de la STEPP recrutés par Oscar Stapel, Camille Guillou, étudiante en DUT Génie Biologie option Génie de l'Environnement à Tours, et Antonin Vivenzio, étudiant en Licence Professionnelle Expérimentation Végétale pour l'Amélioration et la Protection des Plantes Méditerranéennes et Tropicales, qui ont toujours été présents pour moi et sans qui je n'aurais pas pu mener à bien toutes les tâches qui incombent à la production expérimentale comme la mise en culture de l'essai mais surtout la notation des résultats. Ce fut donc un plaisir de travailler en si bonne compagnie sur cet essai préliminaire au projet IRRADIANCE qui a été pour moi une expérience très enrichissante tant professionnellement que personnellement.

Glossaire

Photorécepteur

Pigment qui absorbe sélectivement les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière et acquiert une activité biochimique, déclenchant une chaîne de type : perception de la lumière – transduction – réponse

Sérendipité

Fait de réaliser une découverte scientifique ou une invention technique de façon inattendue à la suite d'un concours de circonstances fortuit et très souvent dans le cadre d'une recherche concernant un autre sujet. La sérendipité est le fait de « trouver autre chose que ce que l'on cherchait ». Selon la définition de Sylvie Catellin, c'est « l'art de prêter attention à ce qui surprend et d'en imaginer une interprétation pertinente ».

Liste des abréviations

ASTREDHOR : l'Association nationale des Structures Régionales d'Expérimentation et de Démonstration en Horticulture

B : Bleu

CO² : Dioxyde de carbone

CRY : Cryptochrome

ETP : Equivalent Temps Plein

FR : Far Red

G : Vert

ha : hectare

HO : Horticulture Ornementale

HPM : High Pressure Mercury

HPS : High Pressure Sodium

LBPV : Laboratoire de Biologie et de Pathologie Végétale

LED : Light-Emitting Diode

MAR : Morphogenic Active Radiation

MF : Matière Fraîche

MH : Metal Halide

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

nm : nanomètre

O : Orange

O² : Dioxygène

PAC : Politique Agricole Commune

PAR : Photosynthetically Active Radiation

PBI : Protection Biologique Intégrée

PHOT : Phototropine

PHY : Phytochrome

PPFD : Densité de Flux de Photons Photosynthétique

R : Rouge

RFI Objectif Végétal : Recherche Formation Innovation Objectif Végétal

SL : Supplementary Lighting

SSL : Sole Source Lighting

STEPP : Station Technique d'Expérimentation des Plantes en Pot

TPE : Très Petites Entreprises

UMR IRHS : Unité Mixte de Recherche Institut de Recherche en Horticulture et Semences

UV : UltraViolet

UVR : Récepteur UltraViolet

W/m² : Watt par metre carré

W : White

Y : Yellow

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

Table des matières

GLOSSAIRE	1
LISTE DES ABREVIATIONS	1
TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES FIGURES	1
TABLE DES TABLEAUX.....	1
TABLE DES ANNEXES	1
EFFET DE SPECTRES LUMINEUX EMIS PAR ECLAIRAGE LED SUR LA PRODUCTION DE JEUNES PLANTS HORTICOLES EN ENVIRONNEMENT CONTROLE	1

1. Introduction à l'essai.....	1
1.1. La STEPP et son environnement	1
1.1.1. Contexte de l'horticulture ornementale française.....	1
1.1.2. L'institut technique national de l'horticulture ASTREDHOR.....	1
1.1.3. La Station Technique d'Expérimentation des Plantes en Pot (STEPP)	2
1.2. Etat des effets de la lumière sur les plantes.....	2
1.2.1. Lumière et cultures horticoles	2
1.2.2. Photosynthèse et croissance grâce au PAR	3
1.2.3. Ultraviolets et Infrarouges en marge du PAR	3
1.2.4. Photomorphogénèse, phototropisme et modulation du développement.....	4
1.2.5. Technologies d'éclairage horticole artificiel	4
1.2.6. Effet de différents éclairages artificiels sur la production de jeunes plantes horticoles	5
1.3. Le projet irradiance.....	6
2. Matériel et Méthodes	4
2.1. Objectif du projet de la STEPP.....	4
2.2. Matériel végétal.....	4
2.3. Dispositif expérimental	4
2.4. Plan expérimental	10
2.5. Traitements/applications	10
2.6. Conduite culturale.....	10
2.7. Mesures.....	11
2.8. Traitement statistique des données	12
3. Résultats.....	13
3.1. Brocoli.....	13
3.1.1. Vitesse de croissance du brocoli	13
3.1.2. Longueur de tige du brocoli	13
3.1.3. Teneur en chlorophylle du brocoli	13
3.1.4. Masse Fraîche du brocoli	13
3.2. Radis.....	13
3.2.1. Vitesse de croissance du radis.....	13
3.2.2. Longueur de tige du radis	13
3.2.3. Teneur en chlorophylle du radis	13
3.2.4. Masse Fraîche du radis	13
13	
3.3. Pois.....	13
3.3.1. Vitesse de croissance du pois	13
3.3.2. Teneur en chlorophylle du pois.....	13
3.3.3. Masse Fraîche du pois	13
3.4. Betterave.....	13
3.4.1. Vitesse de croissance de la betterave.....	13
3.4.2. Longueur de tige de la betterave	13
3.4.3. Teneur en chlorophylle de la betterave	13
3.4.4. Masse Fraîche de la betterave	13
3.5. Tagète Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved.....	16
3.5.1. Vitesse de germination et de croissance des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'	16
3.5.2. Longueur de tige des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'	16
3.5.3. Teneur en chlorophylle et autres pigments des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'	16
3.5.4. Note racinaire des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'	16

4.	Discussion	17
4.1.	Vitesse de germination et de croissance	17
4.2.	Longueur de tige	17
4.3.	Teneur en chlorophylle et autres pigments	17
4.4.	Masse Fraîche	17
4.5.	Note racinaire	17
5.	Conclusion et perspectives	17
5.1.	Conclusion de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE	17
5.2.	Perspectives dans la recherche et l'application de l'éclairage sous LEDs de jeunes plants horticoles en environnement contrôlé.....	17
6.	Bibliographie	21
6.1.	Article de périodique	21
6.2.	Ouvrage collectif.....	21
6.3.	Chapitre d'ouvrage	21
6.4.	Sites Web	21

ANNEXES.....

Annexe I : Comparaison des coûts totaux et amortissements d'éclairage LED et HPS	I
---	----------

Table des figures

▲ Figure 1. ASTREDHOR fédère et représente depuis 1995 des stations régionales d'expérimentation.....	1
▲ Figure 2. Le rayonnement électromagnétique comprend une large gamme de longueurs d'onde.....	2
▲ Figure 3. La photosynthèse chez les plantes supérieures.....	3
▲ Figure 4. Spectre d'absorbance PAR des photorécepteurs contrôlant la photosynthèse.....	3
▲ Figure 5. Spectre d'absorbance des photorécepteurs contrôlant la photomorphogenèse.....	4
▲ Figure 6. Spectres des différentes technologies d'éclairage horticole.....	5
▲ Figure 7. Plants de pétunia et de géranium cultivés pendant 28 et 21 jours uniquement à la lumière du soleil, à la lumière du soleil et à l'éclairage supplémentaire par lampes HPS ou LED.....	6
▲ Figure 8. Pigmentation tachetée pourpre sur les surfaces adaxiales et abaxiales d'une feuille de tagète Marigold French Bonanza 'Flame' produite sous SSL.....	6
▲ Figure 9. Dispositif sur tablette en serre verre pour le témoin M1 de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP.....	9
▲ Figure 10. Dispositif en chambre de culture type « blackbox ».....	9
▲ Figure 11. Plan expérimental de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP.....	10
▲ Figure 12. Disposition des plaques de plantes à massifs (60 alvéoles/plante) et terrines de jeunes pousses maraîchères semées pour chaque modalité.....	10
▲ Figure 13. Spectres lumineux des 4 modalités de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP.....	10
▲ Figure 14. Photographie de sujets de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved représentatifs de l'échelle de notation racinaire.....	12
▲ Figure 15. Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de brocolis. M1 présente des pousses plus courtes que M2, M3 et M4.....	13
▲ Figure 16. Longueur moyenne des jeunes pousses de brocolis. Du collet à l'apex en cm.....	13
▲ Figure 17. Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de brocoli.....	13
▲ Figure 18. Masse fraîche des jeunes pousses de brocoli.....	13
▲ Figure 19. Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de radis. Les jeunes pousses présentent un développement inégal selon les modalités.....	14
▲ Figure 20. Longueur moyenne des jeunes pousses de radis.....	14
▲ Figure 21. Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de radis.....	14
▲ Figure 22. Masse fraîche des jeunes pousses de radis.....	14
▲ Figure 23. Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de pois.....	15
▲ Figure 24. Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de pois.....	15
▲ Figure 25. Masse fraîche des jeunes pousses de pois.....	15
▲ Figure 26. Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de betterave.....	15
▲ Figure 27. Longueur moyenne des jeunes pousses de betterave.....	15
▲ Figure 28. Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de betterave.....	15
▲ Figure 29. Masse fraîche des jeunes pousses de betterave.....	15
▲ Figure 30. Pourcentage de germination des graines de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved en fonction du temps.....	16
▲ Figure 31. Photographie des parties aériennes (A) et racinaires (B) de 3 sujets de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved pris au hasard.....	16
▲ Figure 32. Longueur moyenne des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved.....	16
▲ Figure 33. Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved.....	16
▲ Figure 34. Note racinaire des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved.....	16

Table des tableaux

▼ Tableau I. Caractéristiques et mode d'action des photorécepteurs morphogénétiques.....	4
▼ Tableau II. Valeurs moyennes des concentrations de biomasse et de phytonutriments et d'éléments minéraux dans les pousses des brocolis germés.....	5
▼ Tableau III. Effet de différents éclairages sur des productions de jeunes plantes ornementales issues de semis.....	6
▼ Tableau IV. Espèces de plantes à massifs et de jeunes pousses maraîchères semées pour l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP et conditions de germination.....	8
▼ Tableau V. Conditions de culture de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP.....	11
▼ Tableau VI. Interventions effectuées sur l'essai.....	11
▼ Tableau VII. Critères de notation des racines des jeunes plants de fleurs à massifs.....	12
▼ Tableau VIII. Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de brocolis.....	13
▼ Tableau IX. Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de radis.....	14
▼ Tableau X. Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de pois.....	15
▼ Tableau XI. Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de betterave.....	15
▼ Tableau XII. Durée de germination et de croissance des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'.....	16
▼ Tableau XIII. Bilan des différences observées entre modalités dans les résultats obtenus.....	17

Table des annexes

Annexe I : Comparaison des coûts totaux et amortissements d’éclairage LED et HPS.....I



- ASTREDHOR GRAND EST ● ASTREDHOR RHÔNE-ALPES-AUVERGNE
- ASTREDHOR LOIRE-BRETAGNE ● ASTREDHOR SEINE-MANCHE
- ASTREDHOR MÉDITERRANÉE ● ASTREDHOR SUD-OUEST

▲ **Figure 1.** ASTREDHOR fédère et représente depuis 1995 des stations régionales d'expérimentation. L'Institut s'appuie en région sur 6 unités régionales composées de 10 stations d'expérimentation qui portent le projet de l'Institut et le déclinent au sein de leurs territoires. L'unité nationale, basée à Paris, coordonne l'ensemble des activités de l'Institut. (Auteur et date de publication inconnus).

Effet de spectres lumineux émis par éclairage LED sur la production de jeunes plants horticoles en environnement contrôlé

1. Introduction à l'essai

1.1. La STEPP et son environnement

1.1.1. Contexte de l'horticulture ornementale française

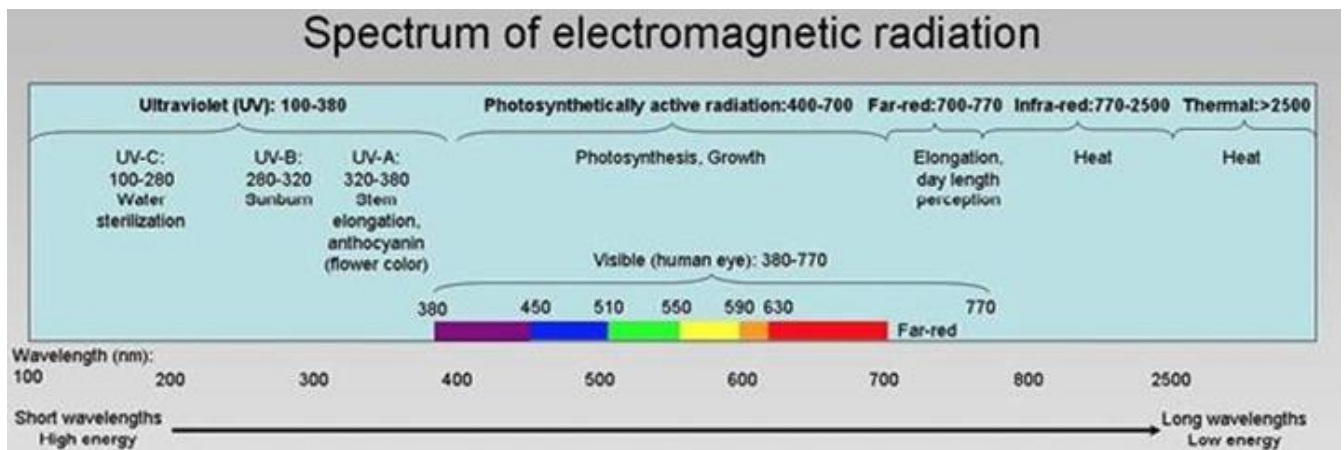
L'horticulture ornementale (HO) est une filière fragile de la production végétale française, peu connue du grand public et des organisations professionnelles agricoles. Les entreprises de la filière, très diversifiées en termes de gamme de production, de surface (ha) et d'Equivalents Temps Plein (ETP), sont fragmentées sur le territoire, du producteur individuel en vente directe sur le marché de proximité à la société de plus d'une centaine de salariés commercialisant une grande part de sa production à l'international. Sans organisation commune de marché, l'HO ne bénéficie pas de la Politique Agricole Commune (PAC) et n'est pas protégée face à la forte concurrence mondiale menée par les Pays-Bas, se retrouvant ainsi dans une position grandement déficitaire.

La dynamique de la filière est aujourd'hui relancée par la création de l'organisation interprofessionnelle de l'horticulture Val'hor, la formation du Pôle de Compétitivité du Végétal Végépolys basé à Angers, capitale du végétal, et l'élaboration du RFI (Recherche Formation Innovation) Objectif Végétal dans la région Pays-de-la-Loire qui mettent en lien de nombreux acteurs comme l'outil technique ASTREDHOR (Association nationale des Structures Régionales d'Expérimentation et de Démonstration en HORTiculture), l'UMR IRHS (Unité Mixte de Recherche Institut de Recherche en Horticulture et Semences) et le LBPV (Laboratoire de Biologie et de Pathologie Végétale) de l'Université de Nantes.

De plus, la filière horticole est promise à une évolution majeure avec l'essor de l'agriculture urbaine, dans un contexte où les populations deviennent de plus en plus urbaines et recherchent, paradoxalement, à se rapprocher de la nature afin d'améliorer leur bien-être.

1.1.2. L'institut technique national de l'horticulture ASTREDHOR

L'institut technique national de l'horticulture ASTREDHOR a pour objectif de concevoir et mettre en œuvre des programmes de recherche et d'innovation au service des professionnels de l'horticulture. C'est une organisation professionnelle principalement financée par des fonds publics et les cotisations de ses adhérents. Elle est composée de 10 stations d'expérimentation réparties en 6 bassins sur le territoire national (**▲ Figure 1**) qui développent de nouveaux outils, produits et techniques capables d'améliorer les performances techniques, économiques et environnementales des entreprises de la filière. L'institut mène à bien cette mission grâce à des équipements à la pointe de l'innovation et au savoir-faire d'une équipe d'ingénieurs et de techniciens, tout en établissant le contact essentiel entre les différents acteurs de la filière : institutions publiques, recherche, formation, innovation et entreprises. L'ASTREDHOR est ainsi le socle technique de la durabilité et de la prospérité de la filière horticole française.



▲ **Figure 2.** Le rayonnement électromagnétique comprend une large gamme de longueurs d'onde. Les longueurs intermédiaires sont interprétées par nos yeux et notre cerveau comme une lumière colorée visible (380-770 nm), et sont également utilisées par les plantes pour la photosynthèse (rayonnement photosynthétiquement actif) (400-700 nm), tandis que des longueurs d'onde tant visibles qu'invisibles (UV de 100-380 nm) sont utiles à la photomorphogénèse (Lopez et Runkle, 2017).

1.1.3. La Station Technique d'Expérimentation des Plantes en Pot (STEPP)

Construite en 1995 à la demande des professionnels, la STEPP est la station de l'ASTREDHOR spécialisée dans l'expérimentation des plantes en pot, située dans le bassin Loire-Bretagne. La STEPP est implantée sur le site du lycée professionnel d'horticulture Saint-Ilan (Langueux, Côtes-d'Armor) où des échanges pédagogiques se font régulièrement avec l'équipe éducative et les élèves, futurs professionnels, qui assimilent ainsi de manière plus concrète les enjeux de la filière.

La station emploie 2 ingénieurs et 1 technicienne (3 ETP) qui disposent de 1 000 m² de serre, 600 m² de tunnel et 1000 m² de plein air pour mettre en place et assurer le suivi d'essais dont le programme est défini par les producteurs adhérents lors de réunions techniques. Les essais de la STEPP se concentrent sur les thèmes ci-dessous :

- Maîtrise de la croissance et de la floraison (techniques chimiques et alternatives comme la thigmomorphogénèse, filtres lumineux, éclairage par diodes électroluminescentes (LED, « Light-Emitting Diode », en anglais))
- Protection des plantes (protection chimique raisonnée, PBI : Protection Biologique Intégrée, micro-organismes)
- Substrat (nouvelles formulations) et fertilisation (engrais de synthèse, engrais organique)
- Nouvelles techniques de multiplication
- Evaluation conteneurs et emballages
- Méthodes économes en consommation d'énergie et d'eau

Les résultats des essais sont ensuite diffusés sous forme de rapports techniques, d'articles de presse professionnelle ou encore de démonstrations.

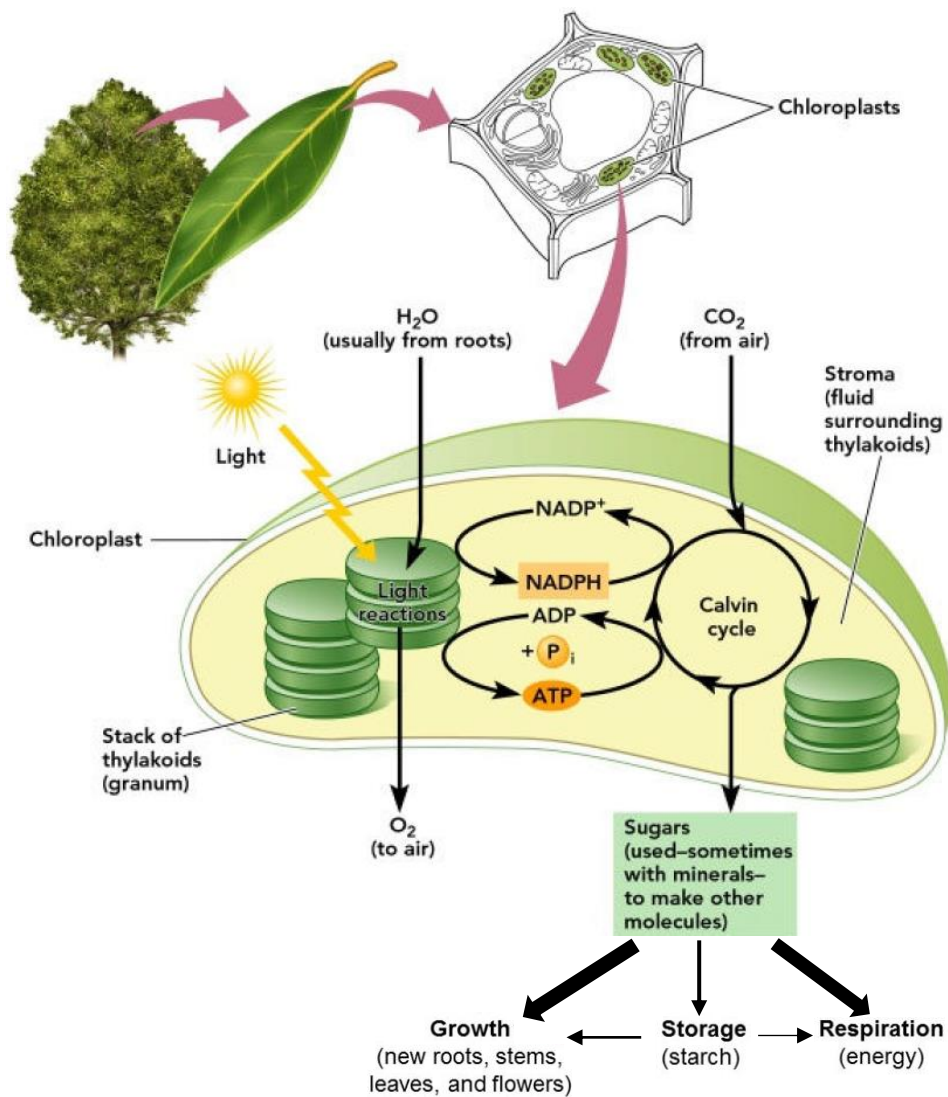
1.2. Etat des effets de la lumière sur les plantes

1.2.1. Lumière et cultures horticoles

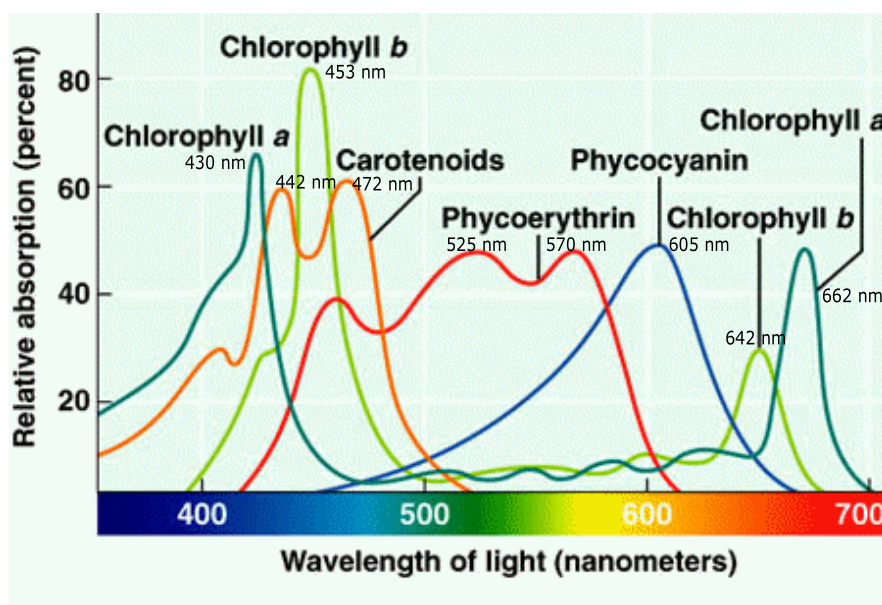
Les producteurs de la filière horticole exploitent la biologie de la photosynthèse et de la floraison pour produire des cultures de haute qualité à des dates de marché bien spécifiques. La lumière est l'élément déterminant dans ces processus physiologiques car elle influence, entre-autres, la croissance, l'architecture et la couleur ainsi que la floraison des plantes.

La lumière est un rayonnement électromagnétique que l'on caractérise d'énergie. L'énergie électromagnétique de n'importe quelle source, solaire ou électrique, peut varier en qualité (couleur ou distribution de longueur d'onde), en quantité (intensité ou quantité d'énergie) et en durée (photopériode et énergie accumulée dans le temps).

La **▲ Figure 2** montre différents types de rayonnement électromagnétique représentés par leur longueur d'onde en nanomètres (nm). Pour utiliser cette source d'énergie lumineuse, les végétaux disposent de nombreux photorécepteurs qui absorbent sélectivement les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière, contenus dans différents organes comme les feuilles, mais aussi les entre-nœuds, le collet et les racines, en fonction de l'espèce et de son stade de développement. Ces photorécepteurs sont des molécules membranaires ou cytoplasmiques de la cellule végétale selon leur rôle photosynthétique, photomorphogénétique ou phototropique et leur mode de fonctionnement dans les voies de signalisation de type : perception de la lumière – transduction – réponse.



▲ **Figure 3.** La photosynthèse chez les plantes supérieures (d'après Lopez et Runkle, 2017; Nabors, 2004).



▲ **Figure 4.** Spectre d'absorbance PAR des photorécepteurs contrôlant la photosynthèse (400-700 nm) (d'après un auteur inconnu, 2015).

1.2.2. Photosynthèse et croissance grâce au PAR

La photosynthèse est fondamentale au cycle biologique sur Terre. C'est une réaction chimique produite par les végétaux, producteurs primaires de la matière organique (MO), leur permettant de synthétiser du dioxygène (O_2) et des molécules organiques comme le glucose (sucre) à partir de dioxyde de carbone (CO_2), d'eau et d'énergie lumineuse (▲ **Figure 3**). Les sucres produits peuvent ensuite être transformés en d'autres molécules organiques comme les acides aminés (constituants des protéines) à travers de nouveaux processus physiologiques impliqués dans la croissance et le développement de la plante, mais aussi être utilisés pour la respiration de la plante ou être stockés sous forme d'amidon. Environ 60 % du sucre qui est produit par la photosynthèse est utilisé pour la croissance des plantes.

Ce sont les photorécepteurs comme les chlorophylles a et b contenues dans la membrane des thylakoïdes empilés sous forme de granum dans les organites des cellules végétales appelés chloroplastes (▲ **Figure 3**), mais aussi, dans une moindre mesure, les caroténoïdes et les phycobilines qui captent l'énergie lumineuse à destination de la photosynthèse (▲ **Figure 4**) (Hopkins et Evrard, 2003). Ce sont les longueurs d'onde comprises entre environ 400 et 700 nm qui sont utiles à la photosynthèse. On parle de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, « Photosynthetically Active Radiation », en anglais) exprimé le plus souvent par la Densité de Flux de Photons Photosynthétique (PPFD) en μmol de photons/ m^2/s . Seulement 43 % de l'énergie solaire est comprise dans le PAR utile aux végétaux. Dans cette région PAR, les photorécepteurs chlorophylliens absorbent principalement la lumière dans les régions bleues (B, 400-500 nm) et rouges (R, 600-700 nm) du spectre lumineux et une petite partie de la lumière verte (G, « Green » en anglais, 500-550 nm) pour la photosynthèse. La raison pour laquelle la plupart des feuilles semblent de couleur verte est que les photorécepteurs absorbent très peu de G, c'est-à-dire que le G est davantage réfléchi par les feuilles par rapport aux autres couleurs de la lumière.

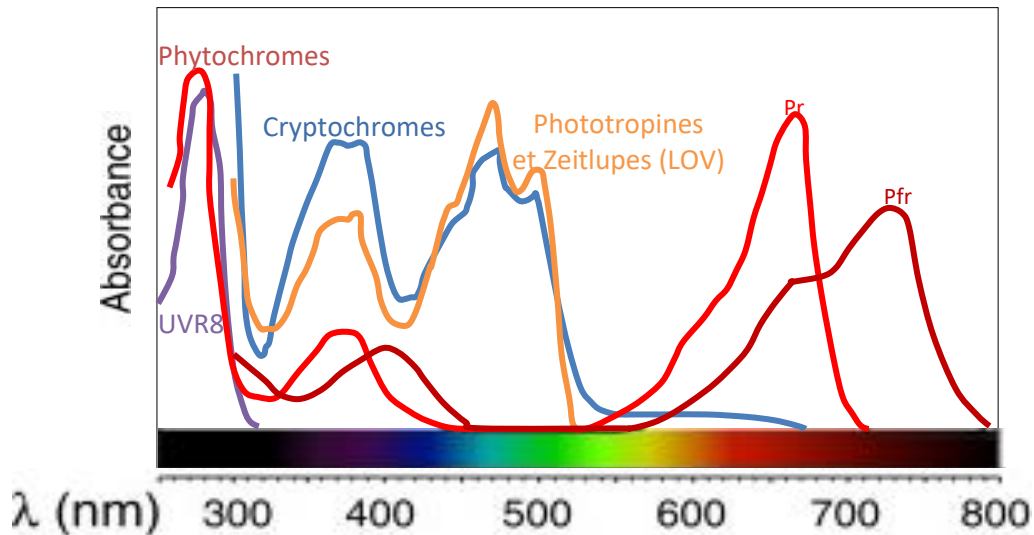
1.2.3. Ultraviolets et Infrarouges en marge du PAR

Le reste du rayonnement du spectre lumineux est composé de longueurs d'onde très courtes à forte énergie comme les rayons ultraviolets (UV, 100-380 nm) et très longues à faible énergie comme les rayons infrarouges (IR, >770 nm).

Les UV-A (320 nm) et UV-B (280 nm) peuvent être nocifs pour les plantes et réduire leur taux de croissance et d'élongation. Les serres verre absorbent et réfléchissent ces UV, limitant ainsi leurs effets sur les cultures sous serre, à l'inverse des cultures d'extérieur (Lopez et Runkle, 2017).

En revanche, les longues ondes de faible énergie administrent de la chaleur. Lorsque celles-ci sont émises dans les serres, elles sont réfléchies et produisent ce que l'on appelle l'« effet de serre ». Par une journée ensoleillée pendant l'été, la lumière solaire extérieure atteint environ $2\,000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ à midi ($108\,000$ lux, $440\ \text{W}/\text{m}^2$ de PAR, ou $1\,000\ \text{W}/\text{m}^2$ d'énergie totale). Selon Lopez et Runkle, 2017, ce niveau d'énergie équivaut à un appareil de chauffage électrique de $1\,000\ \text{W}$ ou à 10 ampoules de $100\ \text{W}$ dans chaque mètre carré d'une pièce. Cela représente beaucoup d'énergie et illustre pourquoi il est difficile de refroidir les serres ou les installations de production intérieures.

MAR: Morphogenic Active radiations



▲ **Figure 5.** Spectre d'absorbance des photorécepteurs contrôlant la photomorphogenèse (280-750 nm) (d'après Costa Galvão et Fankhauser, 2015).

Famille	Localisation	Photo récepteur	Absor bance	PPFD	Etat	Transduction	Réponse
Phyto chromes	Cytoplasme et noyau	PHY A	B R FR	VLFR 10 ⁻⁴ μmol/m ² /s FR-HIR	Labile		
		PHY B	Pr B et R Pfr FR	LFR 10 ⁻³ μmol/m ² /s	Pfr actif stable à la lumière Réversion en Pr inactif à l'obscurité		
Crypto chromes	Cytoplasme et noyau	CRY 1	UV-A B	Forte	Inactif à l'obscurité		
		CRY 2		Faible	Réversible actif à la lumière par oxydoréduction ou autophosphorylation		
Photo tropines et Zeitlupes	Membrane plasmique, cytoplasme et appareil de Golgi	PHOT 1	B G UV-A	<2 μmol/m ² /s Basse et forte	Actif à Inactif par dissociation, changement de conformation et autophosphorylation réversibles		
		PHOT 2		Forte			
UVR	Cytoplasme et noyau	UVR8	UV-B	∅	Actif en 2 monomères dissociés de façon réversible Redimérisation fugace en homodimère inactif		

▼ **Tableau I.** Caractéristiques et mode d'action des photorécepteurs morphogénétiques. Bleu (B), vert (G), rouge (R), rouge lointain (FR), ultraviolet A et B (UV-A et UV-B), Densité de Flux de Photons Photosynthétique (PPFD), Very Low Fluence Response (VLFR), Far-Red High-Irradiance Response (FR-HIR), Low Fluence Response (LFR), facteurs de transcription (FT), jours longs (JL) ou courts (JC) (d'après Costa Galvão et Fankhauser, 2015 ; Fankhauser, 2015).

1.2.4. Photomorphogénèse, phototropisme et modulation du développement

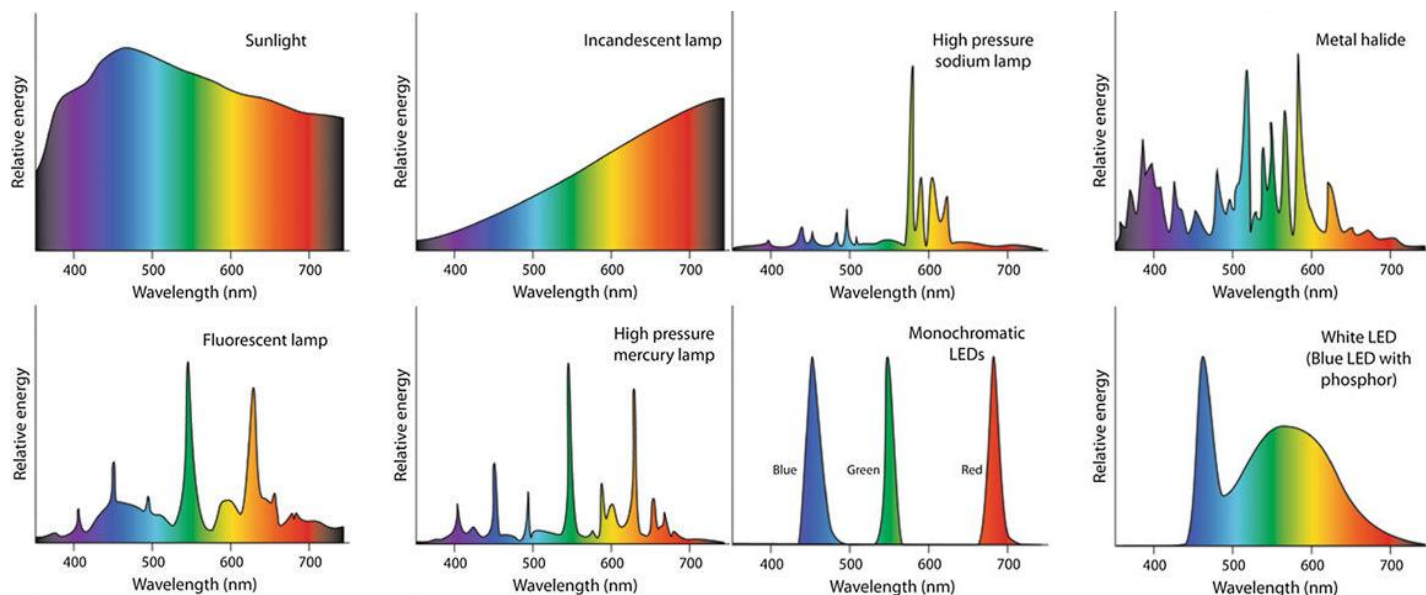
La photomorphogénèse et le phototropisme sont des processus de développement morphologique et directionnel des plantes en réponse à la lumière mais indépendants de la photosynthèse et de la photopériode. Les longueurs d'ondes utiles à la mise en place de ces processus complémentaires à la photosynthèse sont regroupées dans la fraction de rayonnement du spectre lumineux appelée MAR (Morphogenic Active Radiation) (▲ **Figure 5**). Leurs principaux photorécepteurs sont les phytochromes (PHY), qui absorbent dans les régions du spectre correspondant au B mais principalement au R et au rouge lointain (FR, « Far Red » en anglais, 720 nm), les cryptochromes (CRY) et les phototropines (PHOT) absorbant la lumière bleue et les UV-A et enfin les récepteurs des UV-B comme UVR8. Ces familles de photorécepteurs prennent parfois des formes réversibles en fonction de la qualité et de l'intensité de la lumière à laquelle elles sont exposées et déclenchent des réponses variées comme la stimulation de la germination, le dé-étiolement, la floraison, l'évitement de l'ombre, une croissance différentielle dirigée vers la lumière ou encore le maintien de l'intégrité cellulaire (Fankhauser, 2015). Ces éléments sont détaillés dans le ▼ **Tableau I**.

Savoir comment gérer au mieux la quantité, la qualité et la durée de l'éclairage dans des environnements contrôlés peut donc être bénéfique aux producteurs. Par exemple, il leur est possible de développer un cycle de production supplémentaire de jeunes plants, hâter la floraison des plantes à massif ou vivaces, produire des légumes hors saison à des prix plus élevés, retarder la croissance des plantes, augmenter le contenu nutritionnel des légumes ou encore prendre des décisions plus éclairées lors de l'achat de nouvelles structures et de nouveaux équipements.

1.2.5. Technologies d'éclairage horticole artificiel

La présence d'un environnement lumineux favorable est essentielle pour une croissance et un développement optimal des plantes. Les déficits spatio-temporels de la lumière naturelle en fonction des abris horticoles et des saisons limitent la productivité des plantes, ce qui se traduit par un faible rendement quantitatif et qualitatif. Ainsi, des technologies d'éclairage horticole artificiel se développent peu à peu sur le marché afin de compléter ou remplacer la lumière solaire selon les objectifs des producteurs. L'utilisation de ces technologies innovantes permet de répondre à de nouvelles problématiques liées à la qualité des produits en fonction de l'évolution des exigences des consommateurs, à la réduction des durées de culture et à la restriction de l'espace et de l'éclairage disponibles. Il existe, aujourd'hui, des lampes à incandescence, des lampes fluorescentes, des lampes haute pression à base de mercure ou de sodium (HPM, « High Pressure Mercury » ou HPS, « Sodium », en anglais), des lampes à halogénures métalliques (MH, « Metal Halide », en anglais) et enfin des LEDs (▲ **Figure 6**).

D'après Agarwal et Dutta Gupta, 2017, les lampes conventionnelles produisent un spectre fixe, consomment beaucoup d'énergie électrique et ont une durée de vie courte. Elles émettent des IR qui diffusent de la chaleur rayonnante, en particulier les lampes à incandescence, ce qui peut être un inconvénient lorsque l'on souhaite maîtriser la température dans un environnement contrôlé. De plus, leur spectre (550-650 nm) se compose majoritairement de G, jaune (Y, « Yellow » en anglais) et orange (O), au détriment du B et R que l'on souhaiterait abondants. Les LEDs ne produisent pas ou très peu d'IR, facilitant la gestion des températures. A l'inverse, l'intensité lumineuse et le spectre d'émission des LEDs peuvent être réglés pour correspondre aux besoins de l'espèce végétale cultivée. Les LEDs peuvent ainsi émettre des pics de longueur d'onde dans les régions les plus intéressantes du spectre lumineux pour les plantes : B, R et G, dans une moindre mesure. Leur faible consommation d'énergie et leur longue durée de vie en font le choix idéal pour l'éclairage des installations dans les petites et grandes exploitations.



▲ **Figure 6.** Spectres des différentes technologies d'éclairage horticoles (Agarwal et Dutta Gupta, 2017).

▼ **Tableau II.** Valeurs moyennes des concentrations de biomasse et de phytonutriments et d'éléments minéraux dans les pousses des brocolis germés (*Brassica oleracea var italica*) cultivés dans des environnements contrôlés sous éclairage à source unique fluorescent/incandescent ou à LED à B20/R80 à 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. MF : Masse Fraîche, MS : Masse Sèche. (Kopsell et al., 2014).

Traitements lumineux

Paramètre de tissu de pousse	Fluorescent/incandescent	LED B20/R80	Unité
Poids frais	51,0	71,8	g pour 7 g de graines
Phytonutriments			
Chlorophylles totales	60,8	150,1	mg /100 g MF
Caroténoïdes totaux	16,1	21,5	mg /100 g MF
β -carotène	3,3	6,2	mg /100 g MF
Lutéine	6,4	11,2	mg /100 g MF
Glucosinolates totaux	22.5	59.2	μg /g MS
Glucoraphanine	4.5	13.7	μg /g MS
Éléments minéraux			
Calcium	11.4	18.7	μg /g MS
Potassium	10.9	21.5	μg /g MS
Magnésium	3,2	5,6	μg /g MS
Le fer	43,6	74,5	μg /g MS

Par ailleurs, l'éclairage artificiel des productions horticoles est une pratique culturelle vouée à se démocratiser rapidement en raison de ses nombreux avantages et le prix des technologies comme les LEDs, qui diminue déjà, deviendra, dans quelques années, accessible à tous les producteurs désireux d'innover.

Afin de pratiquer l'éclairage artificiel sur leurs cultures, les producteurs doivent déterminer la rentabilité de l'équipement qu'ils souhaitent en fonction de son coût et de son efficacité sur leur culture. Ainsi, la STEPP participe activement à l'évaluation de l'efficacité et la rentabilité de ces nouvelles technologies d'éclairage artificiel à la demande des producteurs adhérents et les conseille tout au long de leur installation. Elle effectue ainsi des essais avec des lampes HPS et des LEDs en éclairage complémentaire (SL, « Supplementary Lighting », en anglais) ou unique (SSL, « Sole Source Lighting », en anglais) sur des sujets de différents stades, allant de la germination à la floraison.

Actuellement, il est profitable de commencer des essais sur de petites surfaces de production. Les jeunes plants se prêtent très bien à la culture sous LEDs grâce à leur haute densité qui rend l'installation de cet éclairage sur une petite surface intéressante d'un point de vue économique (Lopez et Runkle, 2017).

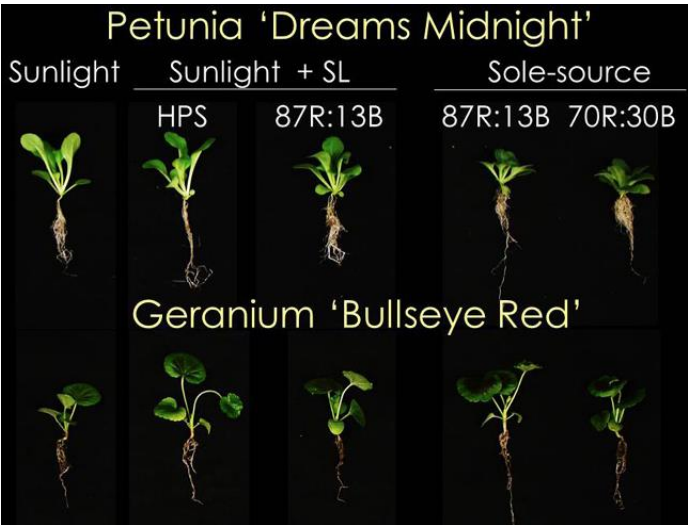
1.2.6. Effet de différents éclairages artificiels sur la production de jeunes plantes horticoles

Des recherches sur les effets des éclairages artificiels sur la production de jeunes plants ont déjà été réalisés à travers le monde, notamment aux Etats-Unis, à l'Université du Tennessee par Kopsell *et al.*, 2014, et à l'Université de Purdue dans l'Indiana, où Lopez et Runkle, 2017, se spécialisent dans ce domaine depuis plusieurs années. Selon Runkle et Lopez, 2017, les éclairages horticoles en SL ou SSL ont un effet bénéfique significatif sur la qualité des jeunes plants par rapport à la lumière du soleil seule et présentent un réel intérêt en production.

Une étude de Kopsell *et al.*, 2014, sur la production de jeunes pousses maraîchères (récolte stade cotylédons/1ères feuilles) utilisées en garniture en raison de leur saveur, de leur texture mais aussi de leurs concentrations élevées en nutriments phytochimiques et minéraux bénéfiques pour la santé présente des résultats pertinents sous LEDs. En effet, l'utilisation de LEDs en SSL par rapport à l'éclairage fluorescent et à incandescence dans un cycle de production de 21 jours nous indique que des germes de brocoli (*Brassica oleracea var italica*) cultivés avec un éclairage LED B20/R80 présentent une masse fraîche (MF) et une quantité de chlorophylle, de caroténoïdes et de nutriments minéraux significativement plus élevées que les graines germées sous éclairage fluorescent et incandescent (▼ **Tableau II**). De plus, un autre essai avec un traitement LED de courte durée de 100 % de B sur les brocolis durant 5 jours, du semis à la récolte (à 41 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) a augmenté de manière significative les concentrations de carotène antioxydant, de glucoraphanine anticancérigène et d'éléments minéraux (tels que P, K, Ca, Mg, Ca, S, B et Fe), comparativement à ceux produits sous un spectre LED B12/R88 à 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Il n'y avait pas de différence significative dans le rendement microscopique de MF entre les deux traitements LED. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les intensités lumineuses et les qualités optimales pour l'application de l'éclairage LED dans la production de jeunes pousses.

▼ **Tableau III.** Effet de différents éclairages sur des productions de jeunes plantes ornementales issues de semis après 21 jours pour le souci et 28 jours pour le pétunia. 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de lumière supplémentaire (SL) et 185 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ d'éclairage à source unique (SSL). Intégrale de la lumière quotidienne photosynthétique (DLI, « Daily Light Integral », en anglais), MF : Masse Fraîche, MS : Masse Sèche. (d'après Lopez et Runkle, 2017).

Traitement	DLI (mol/m^2)	Long. tige (mm)	Surf. feuille (cm^2)	MS racines (g)	MS pousses (g)
Souci français « Durango Yellow »					
Lumière du soleil seulement	6,5	5,2	18,4	12,3	58,6
Soleil + LED	10,6	4,8	26,6	38,3	93,2
Soleil + HPS	10,6	5,5	21,6	44,8	112,6
LED à source unique rouge : bleu (87:13)	10,6	4,5	24,4	29,0	99,7
LED à source unique rouge : bleu (70:30)	10,6	4,6	26,8	39,4	100,9
Géranium « Bullseye Red »					
Lumière du soleil seulement	6,5	1,6	14,5	4,6	36,2
Soleil + LED	10,6	1,5	18,7	7,2	54,4
Soleil + HPS	10,6	1,8	21,6	9,8	58,8
LED à source unique rouge : bleu (87:13)	10,6	1,4	18,1	8,1	63,9
LED à source unique rouge : bleu (70:30)	10,6	1,3	17,5	9,6	66,0
Pétunia « Dreams Midnight »					
Lumière du soleil seulement	6,5	2,0	20,2	6,0	43,5
Soleil + LED	10,6	2,1	24,3	8,7	58,2
Soleil + HPS	10,6	3,0	27,1	8,7	70,9
LED à source unique rouge : bleu (87:13)	10,6	0,8	26,2	12,2	70,6
LED à source unique rouge : bleu (70:30)	10,6	0,6	21,4	13,7	71,0



▲ **Figure 7.** Plants de pétunia et de géranium cultivés pendant 28 et 21 jours uniquement à la lumière du soleil, à la lumière du soleil et à l'éclairage supplémentaire par lampes HPS ou LED à 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ou avec un éclairage à source unique LED délivrant 185 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, pendant 16 heures par jour (Lopez et Runkle, 2017).



▲ **Figure 8.** Pigmentation tâchetée pourpre sur les surfaces adaxiales et abaxiales d'une feuille de tagète Marigold French Bonanza 'Flame' produite sous SSL. (Randall et Lopez, 2015)

Par ailleurs, selon Lopez, 2017, la production de jeunes plants ornementaux sous LEDs présente des effets bénéfiques significatifs pour les producteurs.

En effet, à l'exception des jeunes plants de légumes et de feuilles vertes, la majorité des plantes à massifs annuelles et vivaces sont produites durant l'hiver et au début du printemps dans l'hémisphère Nord. Pendant ce temps, les jours sont courts et l'intégrale de la lumière quotidienne photosynthétique (DLI, « Daily Light Integral », en anglais) peut être un facteur limitant pour la production de jeunes plants de haute qualité, uniformes, compacts, à petites feuilles et bien développés pour faciliter les processus d'expédition et de repiquage. Le DLI moyen reçu en serre est compris entre 5 et 10 mol/m²/j d'octobre à mars (Korczynski *et al.*, 2002). Les éclairages artificiels en SL ou SSL peuvent être utilisés pour atteindre le DLI minimum recommandé de 10 à 12 mol/m²/j pour la production de jeunes plants (Lopez et Runkle, 2007 ; Surrey *et al.*, 2012).

L'équipe a constaté qu'à mesure que le DLI augmentait avec les éclairages en SL ou SSL, la photosynthèse augmentait et les jeunes plants présentaient spécifiquement une meilleure croissance avec une augmentation de la biomasse produite (MS, Matière Sèche, racines et pousses x2 à 4) tout en maintenant proportionnellement une petite surface foliaire compacte (x0,1 à 0,3), avec une élévation des tiges équivalente à réduite (/2 à 3 pour les pétunias en SSL) et plus épaisse (▼ **Tableau III** et ▲ **Figure 7**). De plus, l'éclairage en SSL offre une longueur de tige et une surface foliaire équivalentes à plus petites, avec une MS équivalente à plus élevée selon les espèces. Enfin, le passage en SSL à une concentration plus élevée en B (de 10% à 30%) semble améliorer la qualité des jeunes plants en réduisant leur élévation et surface foliaire tout en augmentant leur MS.

Il est à noter que Randall et Lopez, 2015, font mention, selon des études antérieures, de réactions de pigmentation de certaines variétés de plantes à massifs sous rayonnement UV, B, ou dans des environnements déficients en FR ou dans des environnements dominants en R. Dans leur essai, une tagète Marigold French Bonanza 'Flame' sous SSL a développé des taches pourpre foncé sur la surface adaxiale et abaxiale des feuilles lorsque le pourcentage de B appliqué est passé de 13% à 30% (▲ **Figure 8**). D'autres recherches devraient être menées pour déterminer la cause exacte de la coloration pourpre.

Pour conclure, en raison de la forte densité de jeunes plantes, fournir un éclairage artificiel par SL ou SSL est rentable dans la plupart des situations. En outre, les producteurs de jeunes plants sont de plus en plus intéressés par une production hautement contrôlée dans des salles de croissance multicouches sous SSL, car, comme les résultats de cette étude l'indiquent, la qualité globale des semis cultivés sous SSL peut s'avérer supérieure (plants plus compacts, surface foliaire réduite, meilleure robustesse et masse sèche de racines et de pousses plus importante, croissance plus rapide, meilleur enracinement et potentiellement plus de cycles culturels par saison) à celle des semis cultivés uniquement sous la lumière du soleil ou en SL. Par ailleurs, les jeunes plantes qui sont pourvues d'éclairage artificiel fleurissent généralement plus tôt.

1.3. Le projet irradiance

Les populations françaises et européennes sont de plus en plus urbaines. L'espace consacré au jardin est donc de plus en plus réduit et la demande de « nature » devient pressante. Il faut donc adapter la gamme de végétaux utilisable en ville à cette contrainte de place, en recherchant des plantes plus compactes et ramifiées.

Dans cette optique, le travail réalisé actuellement à la STEPP est un essai préliminaire au projet IRRADIANCE (2018-2021) dont l'objectif est de mettre au point un système innovant de production de plantes horticoles compactes et ramifiées pour mieux répondre au marché urbain émergent.

Le projet est financé par le Ministère de l'Agriculture (CASDAR) et soutenu par l'UMT Stratège, une unité de recherche sur de nouvelles stratégies techniques et marketing pour mieux répondre au marché horticole urbain émergent, regroupant l'INRA (UMR IRHS – Equipe ArchE), AGROCAMPUS OUEST (UMR IRHS – Equipe ArchE), l'ASTREDHOR : ASTREDHOR Loire-Bretagne (Arexhor Pays de la Loire et Stepp Bretagne), ASTREDHOR Sud-Ouest (GIE Fleurs et Plantes) et la Coopérative Fleuron d'Anjou.

Néanmoins, la STEPP n'étant mobilisée et financée que pour des essais durant la dernière année du projet, la station a pris l'initiative de commencer des essais dès 2018 avec ses propres fonds et fera part de ses résultats à la filière tant scientifique que professionnelle.

Le projet IRRADIANCE se déroule en 3 phases :

1. Une culture en milieu totalement artificialisé permettant d'obtenir de jeunes plantes ramifiées en un temps beaucoup plus court grâce à des longueurs d'onde appropriées émises par éclairage LED ;
2. Une phase d'acclimatation des plantes à des conditions de culture sous serre ;
3. La poursuite de la culture de plantes ainsi « endurcies » en conditions contrôlées sous serre avec l'application de techniques culturales alternatives aux régulateurs de croissance.

L'IRHS a déjà effectué un essai préliminaire de la 3^{ème} phase du projet IRRADIANCE avec des rosiers adultes sous LEDs en SSL et ont observé une augmentation significative de la ramification et du nombre de boutons.

L'essai préliminaire réalisé à la STEPP se base sur la 1^{ère} phase, puis les jeunes plants obtenus seront repiqués pour réaliser la 2^{ème} phase.

La difficulté de cet essai est de concevoir et maîtriser un outil de production horticole de type chambre de culture où l'environnement exigeant des jeunes plants issus de semis sera totalement artificialisé. La culture sous LEDs en SSL est un domaine encore peu connu, laissant place à la sérendipité. Par ailleurs, si l'éclairage artificiel peut nous offrir des découvertes inattendues et profitables, cela peut aussi être source d'erreurs et d'obstacles. Il faut donc se préparer aux difficultés et veiller à appréhender ces résultats en toute objectivité.

▼ **Tableau IV.** Espèces de plantes à massifs et de jeunes pousses maraîchères semées pour l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP et conditions de germination (d'après le fournisseur des graines de plantes à massifs *PanAmerican Seed* et le site 'jardinamel.fr').

Nom		Illustration	Germination	
Latin	Commercial		Photosensibilité	Température
<i>Tagetes erecta</i>	Marigold African Taishan 'Orange' Improved		Neutre	21-22°C
<i>Zinnia marylandica</i>	Zinnia Zahara 'Red'			20-23°C
<i>Salvia nemorosa</i> (<i>superba</i>)	Salvia New Dimension 'Blue'			20-22°C
<i>Gazania rigens</i>	Gazania New Day 'Tiger Mixture'			21-22°C
<i>Pelargonium x</i> <i>peltatum</i>	Geranium Ivy Summer Showers 'Burgundy'			21-23°C
<i>Acmella oleracea</i>	Spilanthes 'Peek-A-Boo'		Positive	22-24°C
<i>Tagetes patula</i>	Marigold French Bonanza 'Yellow'			21-22°C
	Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved			
<i>Brassica oleracea</i> <i>var italica</i>	Brocoli		Neutre	21°C
<i>Raphanus sativus</i>	Radis			17 - 29°C
<i>Helianthus annuus</i>	Tournesol			18 - 33°C
<i>Pisum sativum</i>	Pois			13 - 30°C
<i>Beta vulgaris</i>	Betterave			15 - 26°C

2. Matériel et Méthodes

2.1. Objectif du projet de la STEPP

La STEPP souhaite mettre au point une chambre de culture multicouches sous LEDs en SSL, autrement appelée « plant factory » en anglais, capable de s'affranchir des variations climatiques saisonnières et produire rapidement des jeunes plants de haute qualité dans un environnement contrôlé. Pour cela, il est nécessaire de maîtriser le système de culture utilisé et d'y appliquer les bons paramètres pour offrir aux jeunes plants un environnement idéal à leur germination rapide et leur croissance compacte et ramifiée. La chambre de culture multicouches permettra d'appliquer un spectre lumineux différent à chaque étage et d'étudier leurs effets respectifs sur plusieurs espèces de plantes horticoles ornementales et maraîchères afin de trouver l'éclairage idéal. Une fois le système de culture au point et ses spectres déterminés, une évaluation technico-économique de sa rentabilité sera faite par la suite, dans le but de proposer cette méthode de culture à des producteurs horticoles qui souhaiteraient produire leurs propres jeunes plants ou à des producteurs spécialisés dans le jeune plant directement.

2.2. Matériel végétal

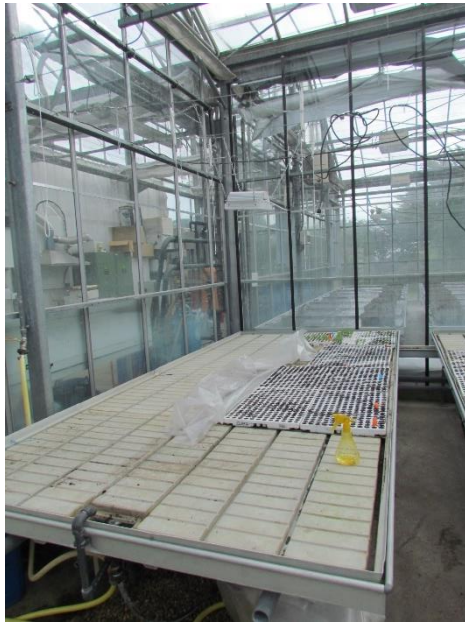
Durant cet essai, 8 plantes à massifs diversifiées en termes d'espèce, mais aussi de variété au sein d'une même espèce, ainsi que 5 espèces de jeunes pousses maraîchères ont été évaluées. Le ▼ **Tableau IV** présente la liste des différentes plantes semées ainsi que leurs exigences de germination. Les graines de plantes à massifs et leurs informations de germination proviennent du fournisseur spécialisé Pan American.

Les différentes plantes à massifs ont été choisies pour leur place importante dans les cultures des producteurs, notamment dans le bassin Loire-Bretagne, et pour leur durée de germination relativement courte (en moyenne 1 semaine) et leur durée de culture entre le semis et le repiquage ne dépassant pas 3 à 4 semaines, afin d'avoir les résultats au plus tôt. Les jeunes pousses maraîchères germent entre 2 à 4 jours et sont prêtes à être récoltées au stade cotylédons/premières feuilles au bout d'environ une semaine. Ces informations sont basées sur une culture sous serre.

2.3. Dispositif expérimental

Il s'agit, en premier lieu, de comparer différentes modalités de culture dont les paramètres sont bien différents, c'est-à-dire, une culture conventionnelle de jeunes plants à la lumière solaire naturelle sous-serre et une culture en SSL en environnement contrôlé. Ensuite, la démarche de cet essai est de comparer entre eux différents spectres de LEDs en SSL en environnement contrôlé.

Les plants de fleurs à massifs issus de semis sont cultivés en plaque alvéolée (60 alvéoles/plante), tandis que les semis de jeunes pousses sont faits en terrine. Ils sont disposés sans répétition sur tablette en serre pour le témoin (M1) (▲ **Figure 9**) et sur tablette sous LED en étage dans une chambre de culture pour les modalités M2, M3 et M4 éclairées en SSL en environnement contrôlé (▲ **Figure 10**).



▲ **Figure 9.** Dispositif sur tablette en serre verre pour le témoin M1 de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP (VL, 2017).



▲ **Figure 10.** Dispositif en chambre de culture type « blackbox » (A) avec un environnement contrôlé et sous LEDs en SSL pour M2, M3 et M4 de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP. Chambre équipée d'un chauffage (B), d'un inducteur et un extracteur d'air (C et D), d'aérations scellées avec des filets « insect-proof » (E) et dont la lumière qui perce à travers est réorientée avec des coudes PVC (Polychlorure de vinyle) (F). Etagère à LEDs en 3 étages avec tablettes de subirrigation (G), réservoir d'eau contenant une pompe immergée (H) et ventilateurs à chaque étage (I). Mesure du rayonnement émis avec des capteurs (J). Observation du dispositif en SSL sous LEDs avec des lunettes protectrices adaptées (K) (VL, 2017).

La chambre de culture de type « blackbox » (**▲ Fig. 10A**) en toile noire à revêtement intérieur aluminium est de dimensions L3x1,5x2,2 mètres.

Afin de contrôler la température (et l'hygrométrie de façon indirecte), la chambre est équipée d'un chauffage (**▲ Fig. 10B**) qui maintien des températures douces la nuit et d'un inducteur et un extracteur d'air (**▲ Fig. 10C et D**) qui recyclent et rafraîchissent l'air de la chambre la journée. Ces 3 appareils sont connectés à des thermostats placés dans la chambre au niveau des cultures et se déclenchent automatiquement une fois le seuil de température paramétré franchi. Les inducteur et extracteur d'air, reliés à la chambre de culture par des gaines insonorisantes, ont un débit respectif de 305 m³/h et 1050 m³/h pour un rapport recommandé entre l'entrée et la sortie d'air de 1/3.

Parce que travailler dans un environnement sain exempt de ravageurs des cultures est primordial, toutes les bouches d'aération de la chambre de culture sont scellées par des filets « insect-proof » (**▲ Fig. 10E**). Elles sont maintenues ouvertes pour optimiser les échanges au printemps/été entre l'air chaud intérieur et l'air plus frais extérieur. La lumière solaire perçante à travers les bouches d'aération qui pourrait éclairer et affecter les cultures en SSL est déviée grâce à des coudes PVC (Polychlorure de vinyle) (**▲ Fig. 10F**).

Concernant le dispositif LEDs, il est réparti en 3 étages hauts de 70cm avec 3 rampes de LEDs par étage pour un recouvrement total et homogène de la surface de culture de 1,3x0,8m. Les rampes de LEDs sont équipées d'un mélange de diodes émettant dans le B, G, R et FR. La couleur du spectre, le temps d'éclairage et l'intensité lumineuse de chaque étage sont réglables individuellement, afin de créer différentes « recettes » de lumière bien précises en fonction de l'espèce, du stade de développement et des critères étudiés en expérimentation.

Les tablettes de culture situées à chaque étage (**▲ Fig. 10G**) se remplissent d'eau filtrée contenue dans un réservoir sous l'étagère grâce à une pompe immergée (**▲ Fig. 10H**) afin d'irriguer les cultures par subirrigation, puis l'eau des tablettes est évacuée (débit réglé par vanne manuelle) et redescend dans le réservoir, créant un circuit fermé.

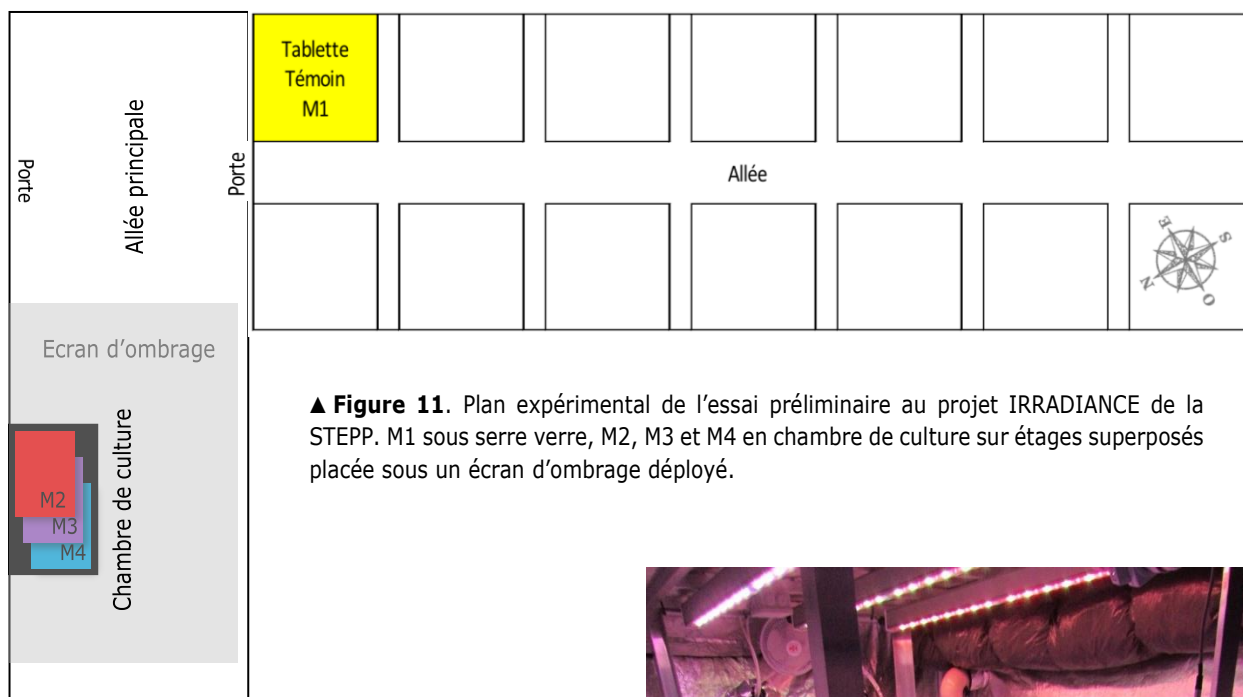
L'éclairage et l'irrigation sont automatisés et réglables à distance sur un moniteur.

Afin de faire circuler l'air au niveau des cultures et d'optimiser les échanges de CO² et O², un ventilateur à vitesse réglable orienté horizontalement au-dessus des cultures est placé à chaque étage (**▲ Fig. 10I**).

Enfin, des capteurs mesurant les rayonnements émis sont placés à proximité des cultures de chaque modalité : en serre pour M1 et à chaque étage dans la chambre de culture pour M2, M3 et M4 (**▲ Fig. 10J**). Un enregistreur (Decagon EM50) note toutes les 30 minutes l'intensité lumineuse PAR de chaque modalité. Par ailleurs, la STEPP dispose d'un spectroradiomètre portable (UPRTech MK350S) pour saisir instantanément et localement les données et la représentation graphique d'un spectre lumineux.

Concernant les effets des LEDs (intensité et couleur du spectre) sur la santé des observateurs, des précautions ont été engagées. En effet, l'œil humain est sensible aux courtes longueurs d'onde à forte énergie comme le bleu. Une partie des LEDs bleues est donc revêtue de phosphore pour créer une lumière blanche (W), offrant un meilleur confort visuel. Cette lumière blanche se traduit sur le spectre lumineux par du G.

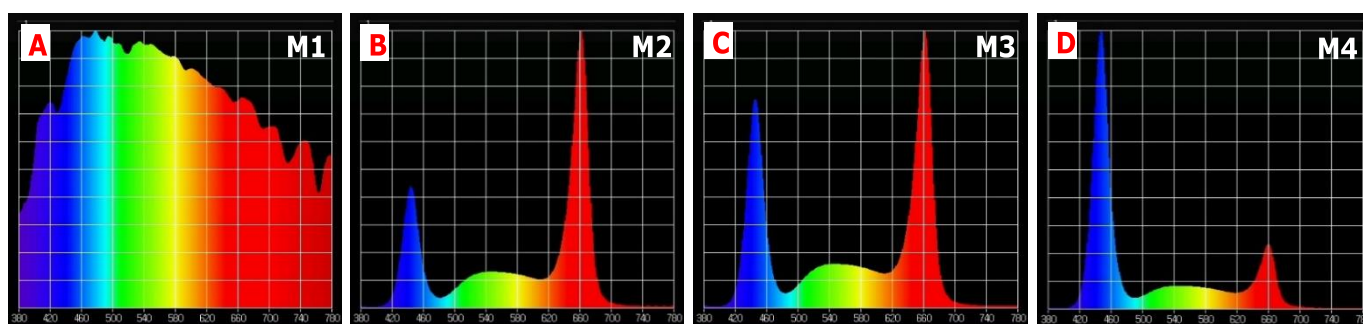
Pour les autres LEDs bleues trop agressives pour la vue, des EPI (Equipements de Protection Individuelle) sont à disposition, plus précisément des lunettes à verres spécialement conçus pour les chambres de cultures en SSL sous LEDs qui filtrent les rayons agressifs émis et permettent de voir toutes les sources de lumière en un spectre « neutre » (**▲ Fig. 10K**).



▲ **Figure 11.** Plan expérimental de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP. M1 sous serre verre, M2, M3 et M4 en chambre de culture sur étages superposés placée sous un écran d'ombrage déployé.



▲ **Figure 12.** Disposition des plaques de plantes à massifs (60 alvéoles/plante) et terrines de jeunes pousses maraîchères semées pour chaque modalité. Aperçu des spectres « Rouge » en haut en M2, « Mixte » au milieu en M3 et « Bleu » en bas en M4 (VL, 2017).



▲ **Figure 13.** Spectres lumineux des 4 modalités de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP. Images prise par spectroradiomètre. Spectre solaire M1 d'une journée ensoleillée de juin en Bretagne à 12h (A), spectre « Rouge » M2 62R20V18B (B), spectre « Mixte » M3 54R20G26B (C) et spectre « Bleu » M4 26R19G55B (D).

2.4. Plan expérimental

Les plaques et terrines semées du témoin M1 sont placées sur tablette dans la serre verre de la STEPP orientée dans un axe Nord-Est/Sud-Ouest. La chambre de culture avec les tablettes de M2, M3 et M4 superposées est placée dans l'allée principale des serres sous des écrans d'ombrage déployés de façon permanente au printemps/été pour réduire l'émission de chaleur sur la chambre de culture noire qui absorberait les IR réfléchis par le rayonnement à travers le verre (▲ **Figure 11**).

Les plaques et terrines sont disposées sans répétition dans un environnement contrôlé homogène, comme visible en ▲ **Figure 12**.

2.5. Traitements/applications

Le témoin M1 sur tablette en serre verre est exposé à la lumière solaire dont une image du spectre a été prise avec le spectroradiomètre à midi lors d'une journée très ensoleillée du mois de juin à Languueux, en Bretagne (▲ **Fig. 13A**). Le DLI sous lumière naturelle variait de 2,1 à 18 mol/m²/j avec, à titre indicatif, une moyenne de 7,4 mol/m²/j (les mesures ont été prises à partir du 2 juin et, ce, jusqu'à la fin de la culture le 15 juin).

Le système de « plant factory » a été paramétré pour un éclairage tous les jours, du semis au repiquage, durant 16h, de 6h à 22h, sur les 3 modalités de la chambre de culture M2, M3 et M4, pour un DLI de 14 mol/m²/j.

Les « recettes » de spectres lumineux établies ont été inspirées par les 2 spectres lumineux réalisés au préalable par l'IRHS, ayant fait un premier essai préliminaire au projet IRRADIANCE sur rosiers. En effet, les chercheurs avaient utilisé un spectre à forte dominance de R et faible part de B additionné d'une pointe de G, et un autre spectre essentiellement B avec très peu de R et de G.

Nous avons reproduit ces deux spectres ainsi que leur intensité avec 239 µmol de photons/m²/s et avons également réalisé un 3^{ème} spectre en regroupant les pics de rayonnement R et B et leur intensité respective.

Ainsi nous obtenons un spectre dit « Rouge » pour M2 avec un rapport 62R20V18B (▲ **Fig. 13B**), un spectre dit « Mixte » pour M3 composé de 54R20G26B (▲ **Fig. 13C**) et un spectre dit « Bleu » pour M4 réparti avec 26R19G55B (▲ **Fig. 13D**).

2.6. Conduite culturale

Toutes les informations relatives aux conditions de culture sont répertoriées dans le ▼ **Tableau V**, tandis que les interventions effectuées sur l'essai sont listées dans le ▼ **Tableau VI**.

Comme l'indique la liste des interventions (▼ **Tableau VI**), nous avons rencontré 2 problèmes majeurs dans la conduite de culture des plantes à massifs. Le premier concerne l'irrigation des cultures sous LEDs. En effet, le mode d'arrosage automatisé par subirrigation du système « plant factory » est encore mal maîtrisé pour des cultures de types semis habituellement arrosées en surface par pluie fine. De plus, la chambre de culture maintient une HR élevée de l'air (jusque 100%), ce qui ne laisse pas l'occasion au substrat de semis utilisé, très rétenteur en eau, de sécher. Cela a causé des stress hypoxiques sur les jeunes plants de fleurs à massifs ainsi que la pourriture de certains et a favorisé le développement de la mouche du terreau, ou sciaride, dont des œufs étaient potentiellement déjà présents dans le terreau.

▼ **Tableau V.** Conditions de culture de l’essai préliminaire au projet IRRADIANCE de la STEPP. Température (T°C) et hygrométrie relative (HR). Les tournesols ont été récoltés 4 jours après avoir atteint leur stade de récolte.

	Témoin (M1)	Spectres SSL LEDs (M2,M3,M4)
Type de jeunes plants	Issus de graines (<i>PanAmerican Seed</i> pour les plantes à massifs).	
Densité de semis	Plantes à massifs 1/alvéole, Brocoli 1,456g/130cm², Radis 1,456g/130cm², Tournesol 7,124g/130cm², Pois 11,43g, Betterave 3,848g/130cm².	
Substrat	Terreau de semis « Mottes Bio B101 » <i>Falienor</i> à pH 6,1 composé de tourbe blonde et noire avec une capacité de rétention en eau à pF1 de 800ml/l de substrat.	
Fertilisation	Substrat enrichi en MO, pas de fertilisation supplémentaire. MO/MS du substrat 80%. 3kg/m3 de FALIORGA 5-3-8, 1kg/m3 de corne fine, 800g/m3 de Bio3Fix. EC 40 mS/m.	
Contenant	Plaques de semis blanches de 240 alvéoles avec 3 plantes à massifs semées par plaque, 60 alvéoles/plante avec une marge non-semée. Terrines de 130cm² pour les jeunes pousses maraîchères.	
Arrosage	A la pomme en brumisation	En subirrigation
Condition	Confinement plastique transparent posé sur les plaques et retiré à la levée	En chambre de culture avec environnement contrôlé
Lieu de culture	Tablette en serre verre	Tablette en chambre de culture
Consignes de T°C et HR	Pas de chauffage. T°C variables de 12°C la nuit jusqu’à 40°C le jour avec des HR variant de 30 à 95%.	Chauffage ≤ 18°C la nuit, inraction d’air à 21°C et extraction d’air à 25°C le jour pour maintenir 18 à 25°C dans une chambre de culture sous serre en été. HR de 60 à 100%.
Eclairage	Lumière solaire naturelle M1	En SSL sous LEDs. Spectre « Rouge » M2 62R20V18B, spectre « Mixte » M3 54R20G26B et spectre « Bleu » M4 26R19G55B.
Période de l’essai	Semis des jeunes plantes à massifs le 25/05/18 en sem.21 pour un repiquage des <i>Tagetes</i> prêt en sem.23 (2 à 3 sem.). Semis des terrines le 06/06/18 et récolte le 11/06/18 pour brocoli et radis (5j), le 14/06/18 pour pois et betterave (8j) et le 19/06/18 pour tournesol (9j prêts à la récolte le 15/06/18 + 4j).	

▼ **Tableau VI.** Interventions effectuées sur l’essai.

Dates	Interventions
25/05/18	Semis jeunes plants de fleurs à massifs. Arrosage à la pomme M1 et réglage subirrigation M2,3,4 2 min tous les j. Films plastiques M1
26/05/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1. Films plastiques M1
27/05/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1. Films plastiques M1
28/05/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1. Films plastiques M1
29/05/18	Comptage germination. Problème humidité substrat M1 : Pas d’arrosage M1, prévu tous les 2 j. Problème thermique critique : graines germées sous plastique M1 brûlées. T°C montées jusque 50°C en journée très chaude. Plastiques des plantes germées retirés.
30/05/18	Comptage germination. Problème humidité substrat M2,3,4 : réglage subirrigation 2 min tous les 2 j.
31/05/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1.
01/06/18	Comptage germination.
04/06/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1.
05/06/18	Comptage germination.
06/06/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1. Problème moisissures M2,3,4 : réglage subirrigation 2 min tous les 3 j. Semis jeunes pousses.
07/06/18	Comptage germination.
11/06/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1. Observation mouches du terreau. Notation résultats terrines brocoli et radis au stade récolte
12/06/18	Comptage germination.
13/06/18	Comptage germination. Arrosage à la pomme M1.
14/06/18	Comptage germination. Notation résultats terrines pois et betterave au stade récolte
15/06/18	Arrosage à la pomme M1. Problème sécheresse substrat M2,3,4 Réglage subirrigation 1 min tous les 2 j. Notation résultats des <i>Tagetes</i> (prêtes 1sem.)
19/06/18	Notation résultats terrines tournesol au stade récolte J+4

Nous avons dû procéder à tâtons pour trouver les paramètres d'irrigation idéaux pour la culture de jeunes plants en subirrigation. Un arrosage tous les 3 jours était trop tardif et a causé un stress hydrique sur certaines cultures comme le tournesol dont les résultats ne sont pas exploitables. Un arrosage par subirrigation de seulement 1 minute tous les 2 jours semblerait donc convenir, cette conclusion sera confirmée par un 2^{ème} essai sous SSL en environnement contrôlé à la suite du repiquage des jeunes plants de celui-ci.

L'autre incident produit sur les premières graines germées de plantes à massifs de M1 est davantage d'ordre exceptionnel et ne sera pas difficile à rectifier à l'avenir. En effet, le film plastique disposé directement sur les plaques semées afin de maintenir une HR élevée pour la germination (**▲ Figure 9**) a favorisé une augmentation considérable de la température des semis ayant atteint près de 45°C durant des journées de forte chaleur (effet « loupe » du film plastique) tandis que de nombreuses graines avaient déjà germé depuis 1 à 2 jours. Il est donc important, à l'avenir, d'être très vigilant quant à la germination des graines en serre, particulièrement par temps chaud et ciel clair, et de retirer le film plastique dès qu'elle est initiée.

2.7. Mesures

Deux des critères de qualité les plus importants pour les jeunes pousses maraîchères sont la longueur de l'hypocotyle et le rendement de MF. Ce genre de produit est également recherché pour ses concentrations élevées en nutriments phytochimiques (chlorophylle, caroténoïdes, etc) et minéraux bénéfiques pour la santé.

Les producteurs de jeunes plants cherchent à faire un produit homogène de qualité en un temps limité. La qualité des jeunes plants de fleurs à massifs se traduit par une compacité avec des tiges de taille réduite mais une bonne ramification et une production de biomasse élevée (MS). La robustesse de la tige (épaisseur au collet) et le bon enracinement de la plante (chevelu racinaire et MS) sont également des critères de qualité importants. Ces exigences permettent, tout d'abord, de pouvoir empiler des plaques de jeunes plants, les trier et les repiquer sans risquer de les abîmer (trop hautes, feuilles qui s'entremêlent et dépassent, etc). Ensuite, cela permet une meilleure reprise de la plante après repiquage, tant d'un point de vue racinaire (racines nombreuses et ramifiées pouvant puiser de l'eau et des éléments minéraux du nouveau substrat rapidement et en grande quantité) qu'aérien avec une multiplication des entre-nœuds et un rendu architectural plus touffu et esthétique favorable à la vente du produit fini.

Avec le matériel de mesure à disposition à la STEPP, voici les mesures effectuées sur l'essai :

- Pour les jeunes pousses maraîchères : Vitesse de croissance (nombre de jours entre le semis et la récolte), longueur de la tige du collet à l'apex (en cm), teneur en chlorophylle et MF (en g)
- Pour les jeunes plants de fleurs à massifs : Vitesse de germination (nombre de jours pour 50% des graines germées après semis), vitesse de croissance (nombre de jours entre le semis et le repiquage), longueur de la tige du collet à l'apex (en cm), teneur en chlorophylle et note racinaire (de 1 à 4)

La teneur en chlorophylle est mesurée de façon non destructive sur les feuilles des plantes à l'aide de l'analyseur en chlorophylle SPAD.

Critères de notation de la vitesse de germination et de croissance :

- Germination : Les radicules ont percé le tégument de 50% des graines
- Récolte/Repiquage : 50% des jeunes plants ont atteint une hauteur fixée pour au moins une modalité

▼ **Tableau VII.** Critères de notation des racines des jeunes plants de fleurs à massifs.

Note	Description de la motte racinaire
4	Plusieurs racines épaisses apparentes autour de la motte et chevelu racinaire au talon. Bonne tenue de la motte
3	Quelques racines apparentes autour de la motte et léger chevelu racinaire au talon. Tenue correcte de la motte.
2	Peu de racines apparentes autour de la motte et pas ou peu de chevelu racinaire au talon. Faible tenue de la motte.
1	Très peu de racines apparentes et pas de chevelu racinaire. Pas de tenue de la motte.



▲ **Figure 14.** Photographie de sujets de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved représentatifs de l'échelle de notation racinaire. De 1 à 4, note croissante (A Pennaneac'h, 2017).

2.8. Traitement statistique des données

Le traitement statistique des données est effectué à l'aide du logiciel professionnel *StatBox* installé à la STEPP en extension du tableur *Excel* du Pack Office.

En raison de la petite surface disponible sous LEDs et du maintien d'un environnement homogène dans la chambre de culture, nous n'avons pas effectué de répétition dans un plan expérimental aléatoire mais une simple disposition des différentes plaques les unes à la suite des autres. Néanmoins, nous travaillons sur des semis allant de 60 graines pour les jeunes plants à plusieurs centaines pour les jeunes pousses. Il est donc possible de faire plusieurs petits échantillons à partir des résultats obtenus et de les traiter comme des répétitions.

Ainsi, en se basant sur de petits échantillons d'environ 15 données (selon les espèces et les modalités, en prenant en compte les pertes des jeunes plants dûes à la pourriture des semis en SSL et au stress thermique des témoins sous lumière solaire) répétés 3 fois, il est recommandé de faire un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis afin de comparer les moyennes de plus de 2 groupes (4 modalités dans le cas présent). Si le test de Kruskal-Wallis indique une différence significative, alors il faudra faire un test non paramétrique de Mann-Whitney afin de comparer 2 à 2 les moyennes indépendantes des différentes modalités et trouver celle(s) qui diffère(nt) des autres.

Ces tests sont applicables sur les variables quantitatives de la longueur des tiges et de la teneur en chlorophylle des feuilles.

La note racinaire (▼ **Tableau VII** et ▲ **Figure 14**) étant une variable qualitative, nous effectuerons une comparaison de proportions 2 à 2 avec le test de χ^2 en regroupant les notes 1 et 2 ensemble et les notes 3 et 4 ensemble pour éviter de comparer des échantillons trop petits de 0, 1 ou 2 valeurs par exemple.

Les vitesses de germination et de croissance ainsi que la MF seront simplement décrites ou représentées sous forme de tableaux et de graphiques sans besoin d'effectuer de test statistique.

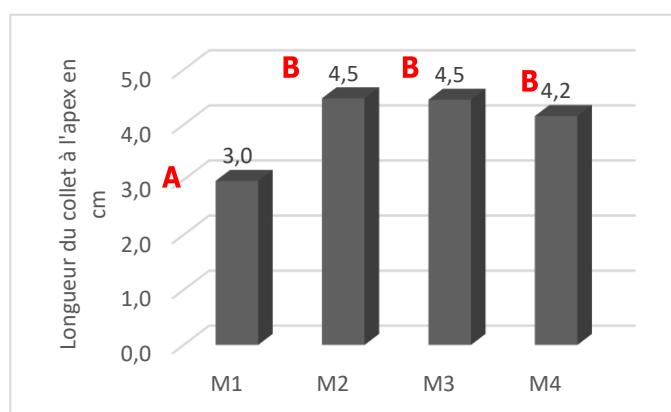
Tous les tests statistiques sont effectués avec un seuil de significativité de 5% (0,05).

▼ **Tableau VIII.** Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de brocolis

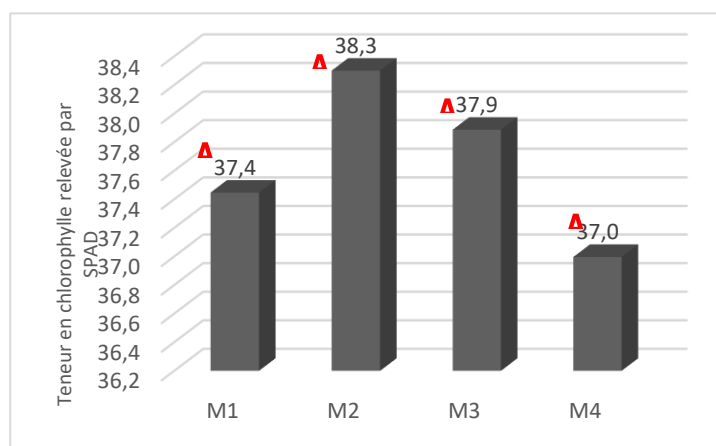
		M1	M2	M3	M4
Brocoli	Semis	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018
	Germination	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018
	Durée (j)	2	2	2	2
	Récolte	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018
	Durée (j)	5	5	5	5
	Semaine	24	24	24	24



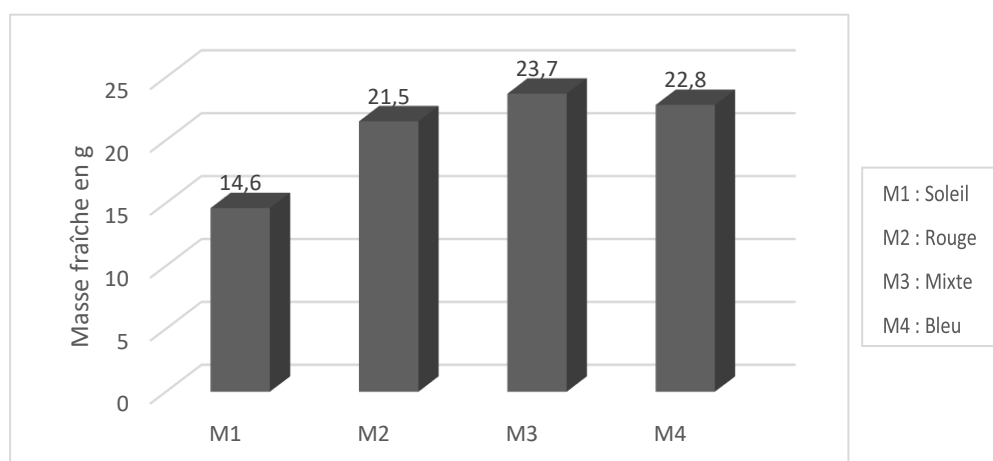
▲ **Figure 15.** Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de brocolis. M1 présente des pousses plus courtes que M2, M3 et M4 (VL, 2017).



▲ **Figure 16.** Longueur moyenne des jeunes pousses de brocolis. Du collet à l'apex en cm. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-Whitney).



▲ **Figure 17.** Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de brocoli. Mesures prise avec un SPAD. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis).



▲ **Figure 18.** Masse fraîche des jeunes pousses de brocoli. En g.

3. Résultats

Parce que la plupart des jeunes plants de fleurs à massifs ne sont pas encore prêts à être repiqués et/ou ont subi des dégâts irréversibles, tout comme le tournesol en semis de jeunes pousses, réduisant leur effectif et biaisant les résultats, seules les espèces semées dont nous avons noté les résultats et qui se sont développées correctement seront étudiées. Ainsi, la série de jeunes pousses maraîchères semées le 06/06/18 s'est très bien développée dans de bonnes conditions de température et d'arrosage, tant chez le témoin M1 que sous les spectres M2, M3 et M4. Nous traiterons donc ces résultats. Néanmoins, parmi les 5 espèces maraîchères semées, le tournesol n'a pas pu être récolté et noté le vendredi 15/06/18 et a souffert d'un fort stress hydrique durant le week-end, ses résultats ne sont donc pas exploitables. Concernant les jeunes plants de fleurs à massifs, la *Tagetes patula* de nom commercial « Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved » s'est particulièrement bien développée et présente des résultats intéressants, à commencer par son aspect visuel en fonction des différentes modalités. Ses résultats seront donc présentés à la suite de ceux des jeunes pousses maraîchères.

3.1. Brocoli

3.1.1. Vitesse de croissance du brocoli

Hauteur de récolte : 4 cm

Comme l'indique le ▼ **Tableau VIII**, les brocolis ont germé rapidement (2 jours dans les 4 différentes modalités). Concernant la récolte effectuée 5 jours après le semis, seules les modalités sous SSL en environnement contrôlé M2, M3 et M4 ont atteint la hauteur de récolte désirée de 4 cm, tandis que M1 mesurait toujours 3 cm en moyenne (▲ **Figure 15**). Nous avons récolté toutes les modalités au même moment afin de comparer entre elles des paramètres comme la MF, etc, mais M1 aurait nécessité plus de jours de culture afin d'atteindre un stade de récolte déjà atteint par les modalités sous LEDs.

3.1.2. Longueur de tige du brocoli

Il y a une différence significative entre le témoin au soleil (M1) dont longueur de tige est d'en moyenne 3 cm et les modalités sous SSL (M2, M3 et 4) qui ont davantage poussé et atteint une longueur similaire comprise entre 4,2 et 4,5 cm (▲ **Figure 16**).

3.1.3. Teneur en chlorophylle du brocoli

Il n'y a pas de différence significative de teneur en chlorophylle entre les 4 différentes modalités du brocoli (▲ **Figure 17**) qui varie légèrement entre 37 et 38,3, bien que les spectres lumineux reçus par les plantes diffèrent par leur intensité et leur qualité (couleurs).

3.1.4. Masse Fraîche du brocoli

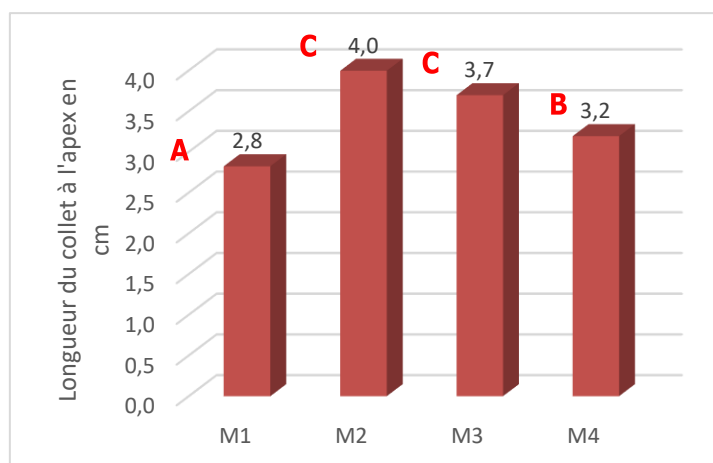
La masse fraîche du témoin (M1) de 14,6g, est nettement inférieure à celle des modalités sous LEDs M2, M3 et M4, respectivement de 21,5g, 23,7g et 22,8g, ce qui corrobore les résultats de hauteur des tiges obtenus et indique que le développement des jeunes pousses sous serre est inférieur à celui en environnement contrôlé. Par ailleurs, il n'y a pas de grande différence entre les MF des trois modalités sous LEDs (▲ **Figure 18**).

▼ **Tableau IX.** Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de radis

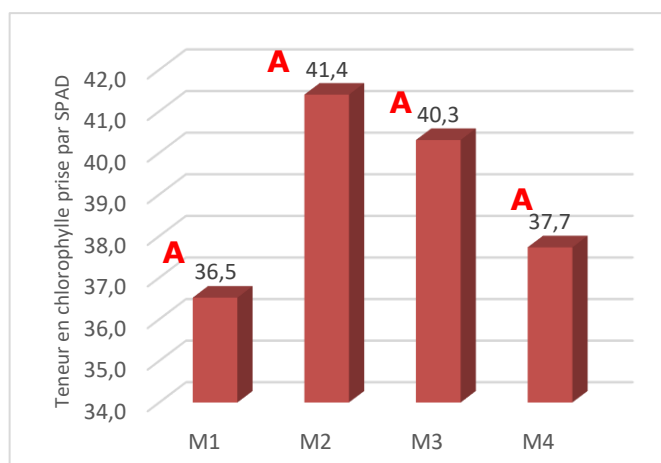
		M1	M2	M3	M4
Radis	Semis	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018
	Germination	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018
	Durée (j)	2	2	2	2
	Récolte	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018
	Durée (j)	5	5	5	5
	Semaine	24	24	24	24



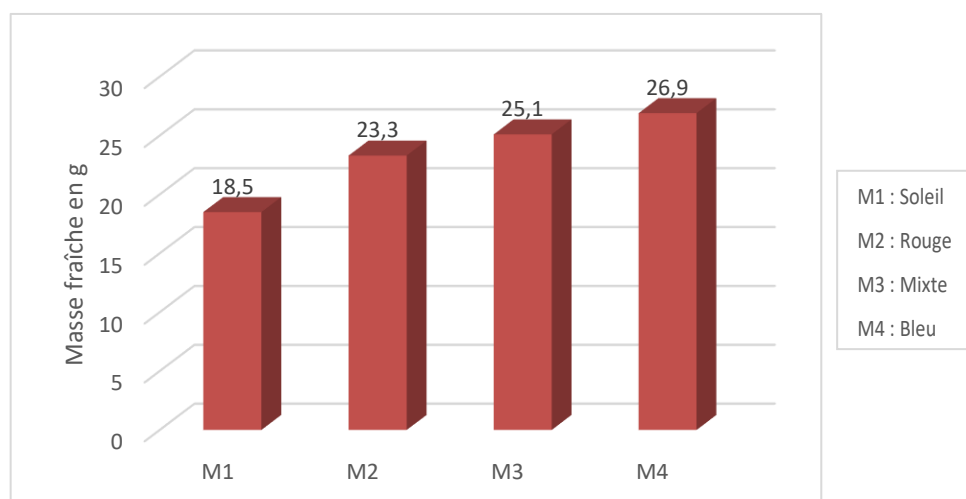
▲ **Figure 19.** Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de radis. Les jeunes pousses présentent un développement inégal selon les modalités (VL, 2017).



▲ **Figure 20.** Longueur moyenne des jeunes pousses de radis. Du collet à l'apex en cm. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-Whitney).



▲ **Figure 21.** Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de radis. Mesures prise avec un SPAD. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis).



▲ **Figure 22.** Masse fraîche des jeunes pousses de radis. En g.

3.2. Radis

3.2.1. Vitesse de croissance du radis

Hauteur de récolte : 3 cm

Tout comme les brocolis, les radis ont globalement germé et poussé très vite (toutes les modalités germées le même jour, 2j après le semis) (▼ **Tableau IX**). Par ailleurs, la différence de développement est moins marquée (▲ **Figure 19**). En effet, M1 atteint presque la hauteur de récolte recommandée de 3 cm tandis que M2, M3 et M4 l'ont franchie (▲ **Figure 20**).

3.2.2. Longueur de tige du radis

Il y a une différence significative entre le radis témoin au soleil (M1) mesurant en moyenne 2,8 cm, et les modalités sous SSL (M2, M3 et 4) qui ont davantage poussé (▲ **Figure 20**). Parmi les modalités sous LEDs, on note une différence entre les radis sous spectre Bleu (M4) atteignant 3,2 cm qui sont plus compacts que les radis sous spectre Rouge (M2) et Mixte (M3) dont la longueur de tige respective de 4 cm et 3,7 cm n'est pas significativement différente.

3.2.3. Teneur en chlorophylle du radis

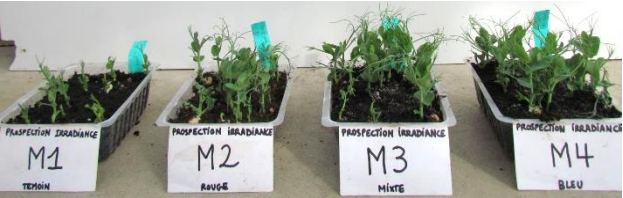
Il n'y a pas de différence significative de teneur en chlorophylle entre les 4 différentes modalités du radis (▲ **Figure 21**) comprise entre 36,5 et 41,4 selon les modalités.

3.2.4. Masse Fraîche du radis

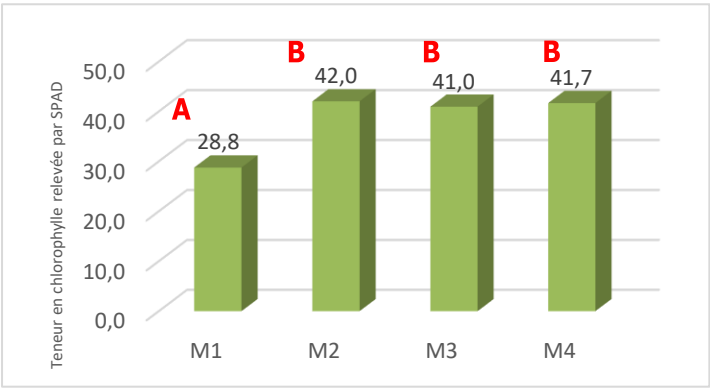
La MF des jeunes pousses de radis est plus élevée chez les modalités sous LED que chez le témoin de 18,5g (▲ **Figure 22**). Cela va de paire avec la légère différence de hauteur des témoins par rapport aux modalités M2, M3 et M4. D'autre part, le spectre Mixte (M3) dont la MF est de 25,1g, semble légèrement favoriser la production de MF des radis par rapport au spectre Rouge avec une MF de 23,3g (M2), et le spectre Bleu (M4) atteint une MF encore plus élevée que M3 avec 26,9g.

▼ **Tableau X.** Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de pois.

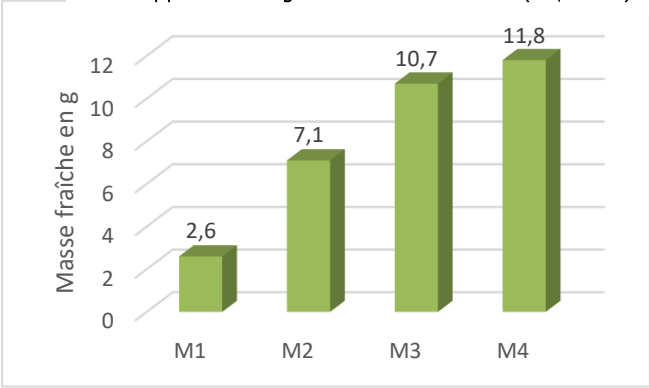
		M1	M2	M3	M4
Pois	Semis	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018
	Germination	10/06/2018	10/06/2018	10/06/2018	10/06/2018
	Durée (j)	4	4	4	4
	Récolte	14/06/2018	14/06/2018	14/06/2018	14/06/2018
	Durée (j)	8	8	8	8
	Semaine	24	24	24	24



▲ **Figure 23.** Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de pois. Les jeunes pousses présentent un développement inégal selon les modalités (VL, 2017).



▲ **Figure 24.** Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de pois. Mesures prises avec un SPAD. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-Withney).



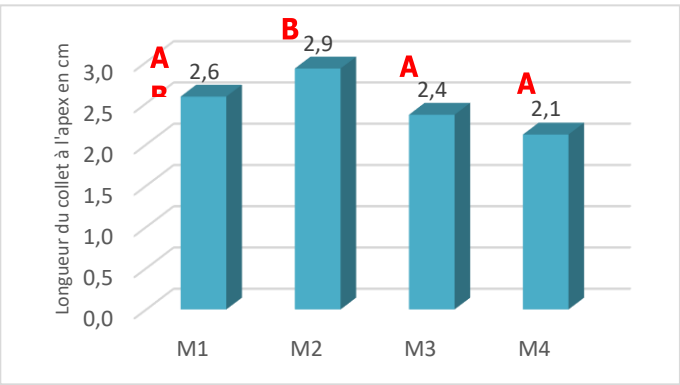
▲ **Figure 25.** Masse fraîche des jeunes pousses de pois. En g.

▼ **Tableau XI.** Durée de germination et de croissance des jeunes pousses de betterave.

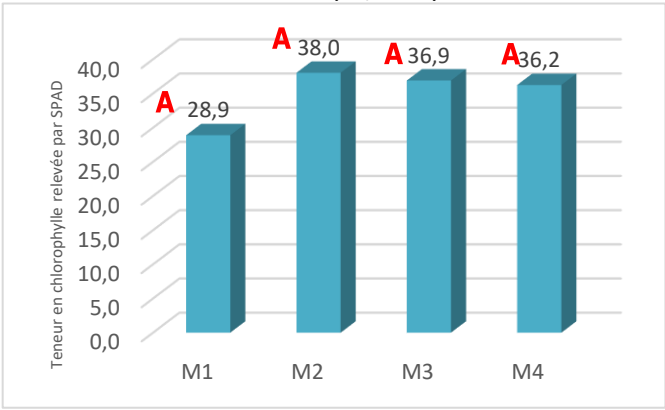
		M1	M2	M3	M4
Bet-terave	Semis	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018	06/06/2018
	Germination	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018	08/06/2018
	Durée (j)	2	2	2	2
	Récolte	14/06/2018	14/06/2018	14/06/2018	14/06/2018
	Durée (j)	8	8	8	8
	Semaine	24	24	24	24



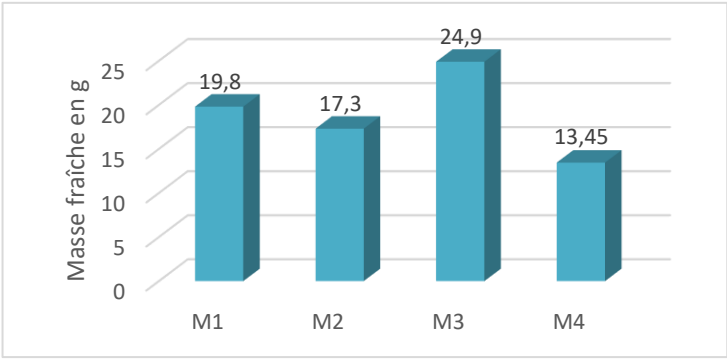
▲ **Figure 26.** Photographie des 4 modalités de jeunes pousses de betterave. Les feuilles de M1 sont plus éclaircies que M2, M3 et M4. 1/3 des pousses de M4 a subi une fonte des semis (VL, 2017).



▲ **Figure 27.** Longueur moyenne des jeunes pousses de betterave. Du collet à l'apex en cm. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-Withney).



▲ **Figure 28.** Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes pousses de betterave. Mesures prise avec un SPAD. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis).



▲ **Figure 29.** Masse fraîche des jeunes pousses de betterave. En g.

3.3. Pois

3.3.1. Vitesse de croissance du pois

Hauteur de récolte : 3,5 cm

Toutes les modalités ont germé au bout de 4 jours. M3 et M4 ont atteint le stade de récolte au bout de 8 jours de culture après le semis (▼ **Tableau X**). La ▲ **Figure 23** nous indique visuellement que M1 s'est très peu développé en 8 jours. M2 présente également une partie aérienne de jeunes pousses réduite, intermédiaire entre M1 et M3.

En raison d'un manque de sujets à mesurer, il n'était pas possible de faire des répétitions d'échantillons assez grands. La longueur des tiges n'a donc pas été traitée statistiquement.

3.3.2. Teneur en chlorophylle du pois

Il y a une différence significative de teneur en chlorophylle entre M1 (28,9) et M2, M3, M4, comprise entre 36,2 et 38 (▲ **Figure 24**). Ces résultats se recoupent avec une appréciation visuelle du stade de développement des jeunes pousses de pois encore au stade cotylédon (feuilles à peine émergées) de la M1 et des pousses bien plus développées des M2, M3 et M4 qui présentent de nombreuses feuilles plus âgées (▲ **Figure 23**).

3.3.3. Masse Fraîche du pois

La MF des jeunes pousses de pois correspond bien à une première appréciation visuelle du développement de chaque modalité (▲ **Figure 23**). En effet, la MF égale à 2,6g de M1 est très réduite alors que celle de M2 est plus élevée avec 7,1g, intermédiaire avec M3 et 4 qui présentent des MF plus ou moins équivalentes (respectivement 10,7g et 11,8g) (▲ **Figure 25**). Les spectres Mixte (M3) et Bleu (M4) semblent encore favoriser la production de MF des radis par rapport au spectre Rouge (M2).

3.4. Betterave

3.4.1. Vitesse de croissance de la betterave

Hauteur de récolte : 2,5 cm

Toutes les modalités de betterave ont germé en même temps (2j) et sont prêtes à être récoltées au même moment (8j), ayant franchi le seuil de hauteur pour 50% des jeunes pousses de 2,5 cm (▼ **Tableau XI**).

3.4.2. Longueur de tige de la betterave

Dans le cas de la betterave, les longueurs moyennes de jeunes pousses présentent des différences significatives. M3 (2,4 cm) et M4 (2,1 cm) ont des longueurs similaires (▲ **Figures 26** et **27**). La modalité M2 présente une longueur de tige de 2,9 cm et est significativement plus grande que M3 et M4. La modalité M1 a une longueur intermédiaire de 2,6 cm et n'est pas différente ni de M2, ni de M3 et M4.

3.4.3. Teneur en chlorophylle de la betterave

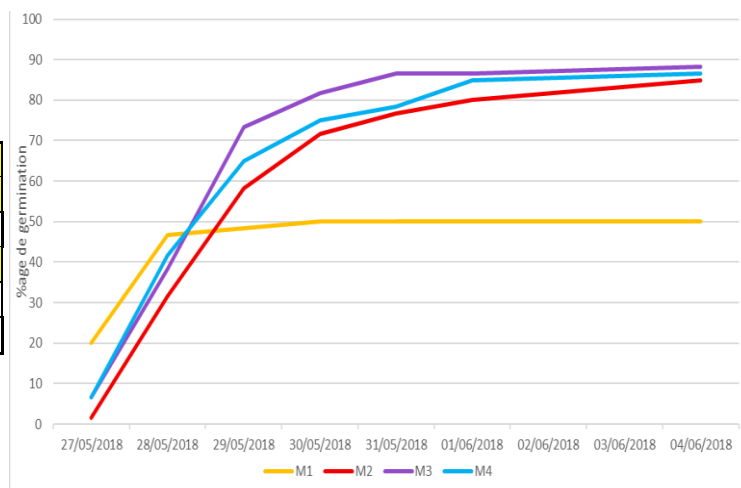
Bien que le feuillage de M1 semble visiblement plus éclairci que le feuillage des modalités sous LEDs (▲ **Figure 26**), le test statistique de Kruskal-Wallis ne révèle pas de différence significative de chlorophylle entre les 4 modalités, comprise entre 28,9 et 38 (▲ **Figure 28**).

3.4.4. Masse Fraîche de la betterave

M3 a une MF nettement plus élevée que M1 avec 24,9g contre 19,8g (▲ **Figure 29**). Concernant les autres modalités, 1/3 des jeunes pousses de M4 a subi une fonte des semis et les jeunes pousses de M2 montrent également des symptômes (▲ **Figure 26**). La MF de ces dernières modalités n'est donc pas comparable aux autres.

▼ **Tableau XII.** Durée de germination et de croissance des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'

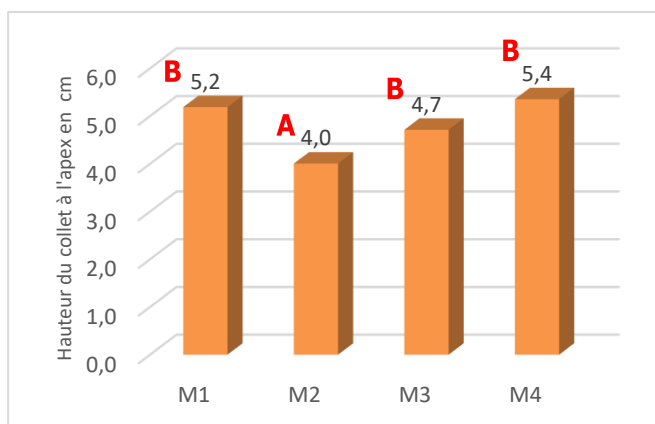
		M1	M2	M3	M4
Tagète Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved	Semis	25/05/2018	25/05/2018	25/05/2018	25/05/2018
	Germination	30/05/2018	29/05/2018	28/05/2018	28/05/2018
	Durée (j)	5	4	3	3
	Repiquage	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018	11/06/2018
	Durée (j)	17	17	17	17
	Semaine	24	24	24	24



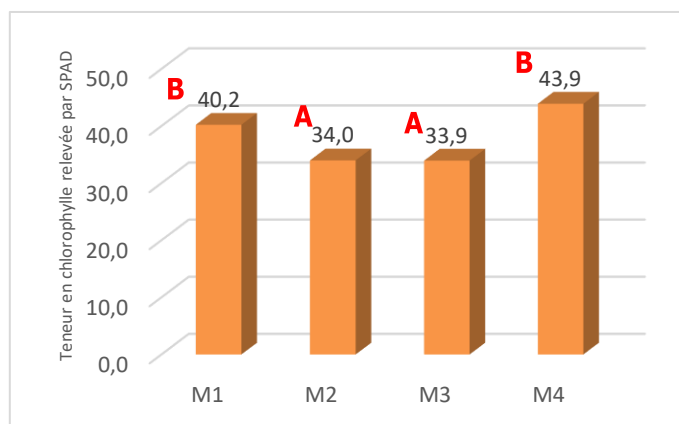
▲ **Figure 30.** Pourcentage de germination des graines de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved en fonction du temps



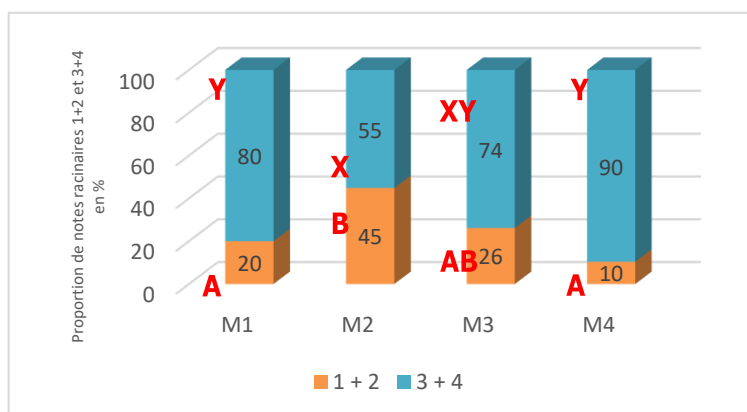
▲ **Figure 31.** Photographie des parties aériennes (A) et racinaires (B) de 3 sujets de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved pris au hasard. Proportions gardées (A Pennaneac'h, 2017).



▲ **Figure 32.** Longueur moyenne des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-



▲ **Figure 33.** Teneur en chlorophylle moyenne des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved. ($P \leq 0,05$, Test de Kruskal-Wallis suivi du test 2 à 2 de Mann-



▲ **Figure 34.** Note racinaire des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved. ($P \leq 0,05$, Test 2 à 2 de χ^2).

3.5. Tagète Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved

3.5.1. Vitesse de germination et de croissance des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'

Hauteur et stade foliaire de repiquage : 4 cm et 4 vraies feuilles

M3 et M4 ont atteint 50% de germination le 28/05/18, c'est-à-dire 3 jours après le semis. M2 a suivi un jour après, le 29/05/18 et M1 le lendemain, le 30/05/18 (▼ **Tableau XII**).

Les modalités en environnement contrôlé sous SSL M2, M3 et M4 ont atteint près de 90% de germination 6 jours après, tandis que la germination de M1 a stagné à 50% (▲ **Figure 30**). Ce phénomène peut s'expliquer par le problème de stress thermique rencontré sur la culture des témoins M1 à l'instant où ils ont atteint 50% de germination, autour du 30/05/18, ce qui a dû dégrader une grande partie des semis qui n'ont jamais pu se développer (▼ **Tableau VI**).

Les jeunes plants des 4 modalités ont mis 2,5 semaines pour atteindre le stade de repiquage souhaité. Il n'y a donc pas de différence notable de vitesse de développement entre les modalités en environnement contrôlé sous SSL LEDs et la modalité sous serre et lumière solaire au printemps/été.

3.5.2. Longueur de tige des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'

La longueur des tiges de M2 est significativement plus petite que celle des modalités M1, M3 et M4 avec 4cm contre des longueurs respectives de 5,2 cm, 4,7 cm et 5,4 cm (▲ **Figures 31B** et **32**).

3.5.3. Teneur en chlorophylle et autres pigments des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'

La teneur en chlorophylle distingue les *Tagetes patula* Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved des modalités M2 et M3 (34 et 33,9) des modalités M1 et M4 (40,2 et 43,9) qui contiennent plus de chlorophylle (▲ **Figure 33**). Par ailleurs, une observation des parties aériennes des feuilles montre une grande différence de pigmentation entre le témoin M1 et les modalités sous LEDs M2, M3 et M4 (▲ **Figure 31A**). En effet, tandis que les feuilles des jeunes plants de tagètes du témoin sont essentiellement vertes, celles des 3 autres modalités sont largement teintées en pourpre. De plus, M4 semble avoir une pigmentation pourpre plus intense encore que M2 et M3.

Cette pigmentation pourpre est probablement due à la production d'anthocyanes par les jeunes plants, pigment des plantes de couleur pourpre.

A titre indicatif et bien que les résultats des autres 2 autres tagètes testées n'aient pas pu être présentés, les feuilles de ces dernières étaient bien vertes quelle que soit la modalité. Ainsi, une différence de réaction face aux LEDs est possible au sein d'un même genre (*Tagetes erecta*, Marigold African Taishan 'Orange' Improved) mais aussi d'une même espèce (*Tagetes patula*, Marigold French Bonanza 'Yellow').

3.5.4. Note racinaire des tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero'

M1 et M4 présentent une très faible proportion de notes racinaires 1+2 (note faible) (10 à 20%) et une forte proportion de notes 3+4 (note forte) (80 à 90%) (▲ **Figure 34**). Ce sont les modalités qui présentent le meilleur résultat de note racinaire. M3 est un intermédiaire entre M1, M4 et M2 avec un rapport faible/forte note racinaire de 26/75. Les résultats racinaires du M3 restent satisfaisants. M2 regroupe de nombreux jeunes plants à la note racinaire faible (près de la moitié) avec un rapport 45/55.

	Vitesse de germination et modalités non prêtes à la récolte	Longueur de tige	Teneur en chlorophylle et autres pigments	Masse Fraîche	Note racinaire
<i>Brocoli</i>	M1	M1<M2, M3 et M4	=	M1<M2, M3 et M4	∅
<i>Radis</i>	=	M1<M4<M2 et M3	=	M1<M2<M3<M4	∅
<i>Pois</i>	M1 et M2 (visuel)	M1<M2<M3 et M4 (visuel)	M1<M2, M3 et M4	M1<<M2<<M3<M4	∅
<i>Betterave</i>	=	M4<M3≤M1≤M2	=	M1<<M3	∅
<i>Tagète</i> <i>Marigold</i> <i>French</i> <i>Bonanza</i> <i>'Bolero'</i>	Germination : M1<M2<M3 et M4	M2<M1, M3 et M4	M2 et M3<M1 et M4 Anthocyanes : M1 sans M2 et M3<M4 (visuel)	∅	M2<M3<M1 et M4

▼ **Tableau XIII.** Bilan des différences observées entre modalités dans les résultats obtenus.

4. Discussion

4.1. Vitesse de germination et de croissance

Comme le montre le ▼ **Tableau XIII** résumant les différences entre les modalités observées dans les résultats, le témoin M1 sous éclairage naturel présente généralement un retard de croissance. Cela signifie que le mode de culture de jeunes plants et pousses sous LEDs en SSL en environnement contrôlé réduit globalement la durée des cycles de production et hâte la récolte par rapport à une culture dite « traditionnelle » sous serre avec un éclairage naturel, comme l'indiquaient Lopez et Runkle 2017.

Cette différence significative peut être due à plusieurs éléments combinés, comme les variations de température mieux maîtrisées dans la chambre de culture, évitant les extrêmes, mais aussi la différence d'intensité lumineuse et de qualité du spectre (couleur) entre la lumière solaire et celle sous LEDs, sachant que le DLI de la culture sous serre est très variable, entre 2,1 et 18 mol/m²/j avec une moyenne sur 2 semaines de juin de 7,4 mol/m²/j, tandis que celui de la chambre de culture est maintenu à 14 mol/m²/j, idéal pour la culture de jeunes plants (Lopez et Runkle, 2017).

En effet, M2 chez le pois n'était pas non plus prête à être récoltée au moment de la notation des résultats, tout comme M1, ce qui signifie que les différentes qualités de spectre sous LEDs ont un effet significatif sur la vitesse de croissance des jeunes pousses. Le spectre M2 à forte dominance de R et très peu de B ne semble pas approprié chez le pois qui a germé, favorisé par la présence de R capté par les PHY, mais ne s'est pas bien développé par la suite. De même, un spectre déficient en B (M2) semble quelque peu ralentir la germination des graines de tagète par rapport aux M3 et M4 qui ont germé les premières.

Par ailleurs, les jeunes pousses de radis et de betterave ne présentent pas de différence significative entre les modalités, suggérant que la sensibilité des plantes à l'intensité (DLI) et la qualité de la lumière reste spécifique.

4.2. Longueur de tige

Les jeunes pousses de M1 et M2 n'ayant pas atteint le stade de récolte au moment de la notation des résultats ont une vitesse de croissance réduite et donc parallèlement une longueur de tige inférieure.

Le radis, dont M1 a malgré tout atteint de justesse le stade de récolte, présente également un retard de croissance et une longueur de tige inférieure par rapport aux modalités sous LEDs.

Concernant la différence entre les modalités sous LEDs ayant atteint le stade récolte, le brocoli et le pois ont une longueur de tige équivalente pour toutes les modalités, ce qui signifie que la tige de brocoli et de pois s'étiole autant, quelle que soit la variabilité de R et de B dans les spectres.

A l'inverse, le radis et la betterave présentent une différence significative entre la longueur de tige des modalités au stade récolte équivalent. En effet, M4 est plus compacte avec des longueurs de tige inférieures aux M3, M1 et M2. Autrement dit, plus il y a de bleu et plus les tiges sont courtes. Le spectre abondant en B favorise donc l'activité des phytochromes et des CRY qui empêchent l'ubiquitination des FT et favorise les réponses photomorphogénétiques.

La tagète Marigold French Bonanza 'Bolero', dont toutes les modalités ont atteint un stade de récolte satisfaisant, présente des résultats d'interprétation similaire à ceux du radis. En effet, la modalité (M2) déficiente en B présente une longueur de tige plus élevée que les 3 autres modalités M1, M3 et M4 contenant 2 à 3 fois plus de bleu. Les tagètes sont donc plus compactes grâce à l'action des longueurs d'onde bleues sur la photomorphogénèse.

Ces interprétations rejoignent à nouveau celles de Lopez et Runkle, 2017, qui avaient remarqué qu'une augmentation de B dans le spectre lumineux était bénéfique pour les jeunes plants en les rendant plus compactes (longueur de tige réduite).

4.3. Teneur en chlorophylle et autres pigments

La production du photorécepteur photosynthétique chlorophyllien ne semble généralement pas varier chez les jeunes pousses en fonction de l'intensité lumineuse (M1 par rapport à M2-M3-M4). Cela suggère que la production de chlorophylle chez les jeunes pousses peut, peut-être, varier en cas d'intensités lumineuses extrêmes, mais qu'elle reste plutôt stable chez des sujets à ce stade de développement trop précoce pour observer des différences de production chlorophyllienne dans les cotylédons. La teneur en chlorophylle ne varie pas non plus selon les variations de qualité du spectre PAR. Elle est donc produite sans distinction dans toute la région du PAR utilisé par les plantes.

Par ailleurs, certaines plantes, à un stade plus développé (4 feuilles dans le cas présent) peuvent montrer des sensibilités plus accrues aux variations d'intensité et de qualité de la lumière. C'est le cas de la tagète Marigold French Bonanza 'Bolero' qui produit plus de chlorophylle avec un faible rapport R/B, correspondant aux modalités M1 et M4 de l'essai, tandis que M2 et M3 ont une proportion de rouge élevée. La variété de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero', contrairement à l'autre testée 'Yellow', présente également une production unique de pigments pourpres associés aux anthocyanes chez les 3 modalités sous LEDs, avec une intensité visuellement plus prononcée chez M4 par rapport aux M2 et M3. Comme nous informait Randall et Lopez dans leur étude de 2015, il semblerait que des spectres lumineux à forte dominance en R, comme M2 et M3, et surtout en B, comme M4, aient une influence sur la production d'anthocyane sur les tagètes Marigold Bonanza. En effet, les chercheurs avaient travaillé sur une tagète Marigold French Bonanza 'Flame'. Nous avons utilisé deux autres variétés de tagètes Marigold French Bonanza dont l'une reproduit cette pigmentation pourpre ('Bolero'), tandis que l'autre non ('Yellow'). Cela nous indique que ce ne sont pas seulement les espèces mais aussi les variétés au sein d'une même espèce de plantes qui réagissent différemment aux variations de spectres sous LEDs.

4.4. Masse Fraîche

Chez le brocoli, tout comme la hauteur ne variait pas entre les différents spectres lumineux, la MF non plus. Cela confirme que le brocoli ne réagit pas différemment aux 3 différents spectres sous LEDs appliqués et seulement à la différence d'éclairage et probablement aussi la variation importante de température (jour/nuit) entre la culture sous serre avec lumière naturelle (M1) et celle en chambre de culture en environnement contrôlé sous SSL (M2, M3 et M4). Selon Lopez et Runkle, 2017, plus le DLI est élevé, plus l'activité photosynthétique est stimulée et plus la production de biomasse, MF dans le cas présent, est grande. Cela justifie les résultats obtenus.

Pour le radis, le pois et la betterave, une fois de plus, le B fait son effet puisque plus il est abondant, plus la MF est élevée alors que les résultats de longueur de tige nous indiquaient, dans certains cas, des longueurs équivalentes pour plusieurs modalités et même inférieures pour M4, la plus abondante en bleu (longueur $M4 < M2$ et $M3$ chez le radis). Cette augmentation de MF ne vient donc certainement pas de la longueur des tiges mais la stimulation des voies de photomorphogénèse induite par le B a pu augmenter la production de biomasse comme l'épaisseur des tiges ou encore le développement de l'appareil foliaire (surface et/ou épaisseur des feuilles).

4.5. Note racinaire

Tout comme pour la chlorophylle chez les tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero', il semblerait que le développement racinaire soit lié au rapport R/B. En effet, plus il est élevé, avec un taux élevé de R et une déficience de B, moins les parties racinaires des mottes de jeunes plants sont de qualité. Le B participe donc également à la morphogénèse des racines.

5. Conclusion et perspectives

5.1. Conclusion de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE

Tout d'abord, la production de jeunes plants et pousses sous LEDs en environnement contrôlé semble globalement plus rapide que la culture dans des conditions « traditionnelles » en serre sous lumière naturelle, à l'exception de certaines espèces qui ne présentent pas de différence significative de croissance, ce qui rejoint les conclusions de Kospell (2014) et Lopez et Runkle (2017) présentées en introduction.

Cette différence de développement s'explique, en partie, par une DLI mieux adaptée sous environnement contrôlé avec LEDs ainsi qu'une température mieux maîtrisée, permettant d'offrir les meilleures conditions de croissance aux jeunes plants et pousses (DLI entre 10 et 14 mol/m²/j sous LEDs), quelles que soient les variations climatiques saisonnières extérieures (DLI moyen reçu en serre compris entre 5 et 10 mol/m²/j d'octobre à mars selon Lopez et Runkle, 2017, et de entre 2,1 et 18 mol/m²/j à la STEPP entre mai et juin 2018).

La vitesse de croissance augmentée se traduit par un stade de développement atteint différent entre M1 en serre sous lumière naturelle et M2, M3 et M4 en environnement contrôlé sous LEDs, caractérisé par des hauteurs de tige et des MF plus élevées.

Par ailleurs, pour une vitesse de croissance équivalente au sein des jeunes plants et pousses sous LEDs, ayant atteint au même moment le stade de repiquage désiré (hauteur, stade foliaire), on note une différence de compacité entre les modalités sous éclairage dominant en R et déficient en B (M2, parfois M3) et celles sous éclairage davantage fourni en B (M4, parfois M3 et même M1 dans certains cas, dont le spectre solaire contient davantage de B que de R). En effet, les spectres avec un rapport R/B assez faible présentent des tiges plus compactes chez certaines espèces comme la betterave et le radis. Cette observation avait déjà été faite dans des études antérieures sur les effets des éclairages LED sur la production de jeunes plants en environnement contrôlé (Kospell (2014), Lopez et Runkle (2017)).

Le B n'a pas toujours d'effet significatif positif sur la compacité des jeunes plants. C'est le cas de la tagète Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved qui semble avoir des tiges plus courtes avec un rapport de R/B élevé. Ce résultat est à interpréter avec modération car les jeunes plants sous M2 présentent globalement une qualité inférieure à celle des autres modalités, tant pour la chlorophylle que pour la note racinaire. Il est donc possible que les difficultés rencontrées dans la gestion de l'environnement en chambre de culture aient eu un impact sur la culture des tagètes en M2. Il est nécessaire d'approfondir ces éléments par de nouvelles recherches.

D'autre part, le B semble avoir un effet positif sur la production de biomasse pour des stades de développement (longueurs de tige) équivalents, comme chez le radis. Bien que nous n'ayons pas étudié en détail le développement des différents organes des jeunes pousses (qualité des cotylédons et de la tige), il est possible que le B ait favorisé le développement foliaire ou la force de la tige (diamètre). Il en va de même pour la qualité des mottes racinaires des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved qui présentent un meilleur développement visuel des racines sous des spectres LED avec une dominance de B. Une fois de plus, cela correspond aux déclarations des chercheurs W.Randall, R.Lopez et E.Runkle qui ont noté durant leurs recherches une augmentation des feuilles, des racines, de la solidité de la tige et de la biomasse produite avec davantage de B.

La production de pigments photorécepteurs ne reste pas en marge puisqu'elle est également améliorée sous spectres avec une lumière B plus élevée dans le cas des jeunes plants de tagètes Marigold French Bonanza 'Bolero' Improved qui sont à un stade de développement plus avancé (4 feuilles) que les jeunes pousses maraîchères (cotylédons). En effet, les photorécepteurs comme la chlorophylle mais aussi l'anthocyane, apparue uniquement sous les 3 modalités de SSL, se sont révélés majoritaires dans des conditions d'éclairage élevées en B, ce qui corrobore les conclusions de W.Randall (2014) sur l'importance du B dans la production de phytonutriments et d'éléments minéraux.

5.2. Perspectives dans la recherche et l'application de l'éclairage sous LEDs de jeunes plants horticoles en environnement contrôlé

Les résultats de cet essai confirment qu'il existe un réel intérêt à la production de jeunes plants horticoles sous SSL en environnement contrôlé. En effet, cette technique de culture permet généralement d'effectuer des cycles de culture plus rapides de jeunes plants et pousses et de meilleure qualité, plus compacts, épais, solides et mieux enracinés. Néanmoins, certaines espèces réagissent mieux à ces conditions de culture que d'autres qui ne présentent pas de différence significative de rapidité ou de qualité de culture entre la culture « conventionnelle » et celle sous LEDs en environnement contrôlé.

Par ailleurs, la production de biomasse augmente aussi avec un éclairage sous LEDs, particulièrement enrichi en B, ce qui est un atout majeur pour les producteurs de jeunes plants de fleurs à massifs mais surtout pour la production de jeunes pousses maraîchères.

De plus, la culture sous LEDs peut représenter un intérêt particulier pour la production de plantes comestibles enrichies en phytonutriments, comme les anthocyanes, ou en éléments minéraux.

Cette technique de culture peut enfin améliorer un critère important dans la production horticole qui est l'attractivité de certains produits, grâce à l'esthétique (plantes plus touffues, colorées).

Ces premiers résultats sur la culture horticole sous LEDs SSL en environnement contrôlé, un domaine encore peu connu, sont positifs mais mettent également en évidence tout le chemin qu'il reste à parcourir pour mieux comprendre les effets de ce système sur les plantes et maîtriser les futures productions de type « plant factory ».

En effet, l'importance majeure du R et de son rapport R/FR sur les cultures (germination, croissance) est relativement bien connue, mais les effets du B dans ce type de système de culture le sont bien moins. Le B serait capital et nécessaire en grande quantité pour améliorer la qualité des jeunes plants sur de nombreux aspects. Nous savons seulement jusqu'à présent que ce sont les PHY et les CRY qui captent le B et notamment les CRY qui empêchent l'ubiquitination de certains FT impliqués dans des réponses photomorphogénétiques. De plus, le phénomène de pigmentation pourpre des plantes éclairées sous LEDs avec des rayonnements dominants de R ou de B déficients en FR est encore peu connu.

Il serait intéressant de poursuivre les recherches fondamentales dans ce domaine afin de déterminer plus précisément les voies de signalisation impliquées et leurs réponses directes ou indirectes sur la physiologie de la plante.

En parallèle, les stations d'expérimentation horticole comme la STEPP (ASTREDHOR Loire-Bretagne) s'emploient à faire des recherches appliquées sur les effets de l'éclairage sous LEDs en SSL en environnement contrôlé sur la production de jeunes plants, sachant qu'il existe presque autant de « recettes » de spectre possibles que de plantes horticoles cultivées (espèces, genres mais aussi variétés) répondant différemment à la quantité (intensité, DLI) et la qualité (couleurs) de l'éclairage.

Dans cet optique, j'ai pour projet, durant le reste de mon stage à la STEPP qui se termine fin août, de recommencer cet essai, cette fois-ci, avec des conditions d'irrigation mieux maîtrisées ainsi qu'un nombre d'espèces horticoles restreint afin de faire un plan expérimental avec des répétitions et d'effectuer des tests statistiques plus robustes me permettant de vérifier mes résultats obtenus lors de ce 1^{er} essai.

Ce domaine de recherche est donc en progrès constant et chaque acteur de la filière horticole peut y apporter ses connaissances et sa réflexion afin de développer des techniques de cultures sous éclairage artificiel en environnement contrôlé adaptées aux besoins des producteurs dépendants de la performance du spectre solaire parfois limitée selon les saisons.

6. Bibliographie

6.1. Article de périodique

- Galvão VC, Fankhauser C. 2015. Sensing the light environment in plants: photoreceptors and early signaling steps. *Current Opinion in Neurobiology* 34, 46–53.
- Kopsell, D.A., C.E. Sams, T.C. Barickman, and R.C. Morrow. 2014. Sprouting broccoli accumulate higher concentrations of nutritionally important metabolites under narrow-band light-emitting diodes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 139:469–477.
- Randall WC, Lopez RG. 2015. Comparison of Bedding Plant Seedlings Grown Under Sole-source Light-emitting Diodes (LEDs) and Greenhouse Supplemental Lighting from LEDs and High-pressure Sodium Lamps. 50, 9.

6.2. Ouvrage collectif

- Hopkins, William G, et Charles-Marie Évrard. *Physiologie végétale*. Bruxelles: De Boeck, 2003.
- Lopez, Roberto, et Erik Runkle. *Light Management in Controlled Environments*, 2017.

6.3. Chapitre d'ouvrage

- Dutta Gupta S, Agarwal A. 2017. Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. In: Dutta Gupta S, ed. *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Singapore: Springer Singapore, 1–25.

6.4. Sites Web

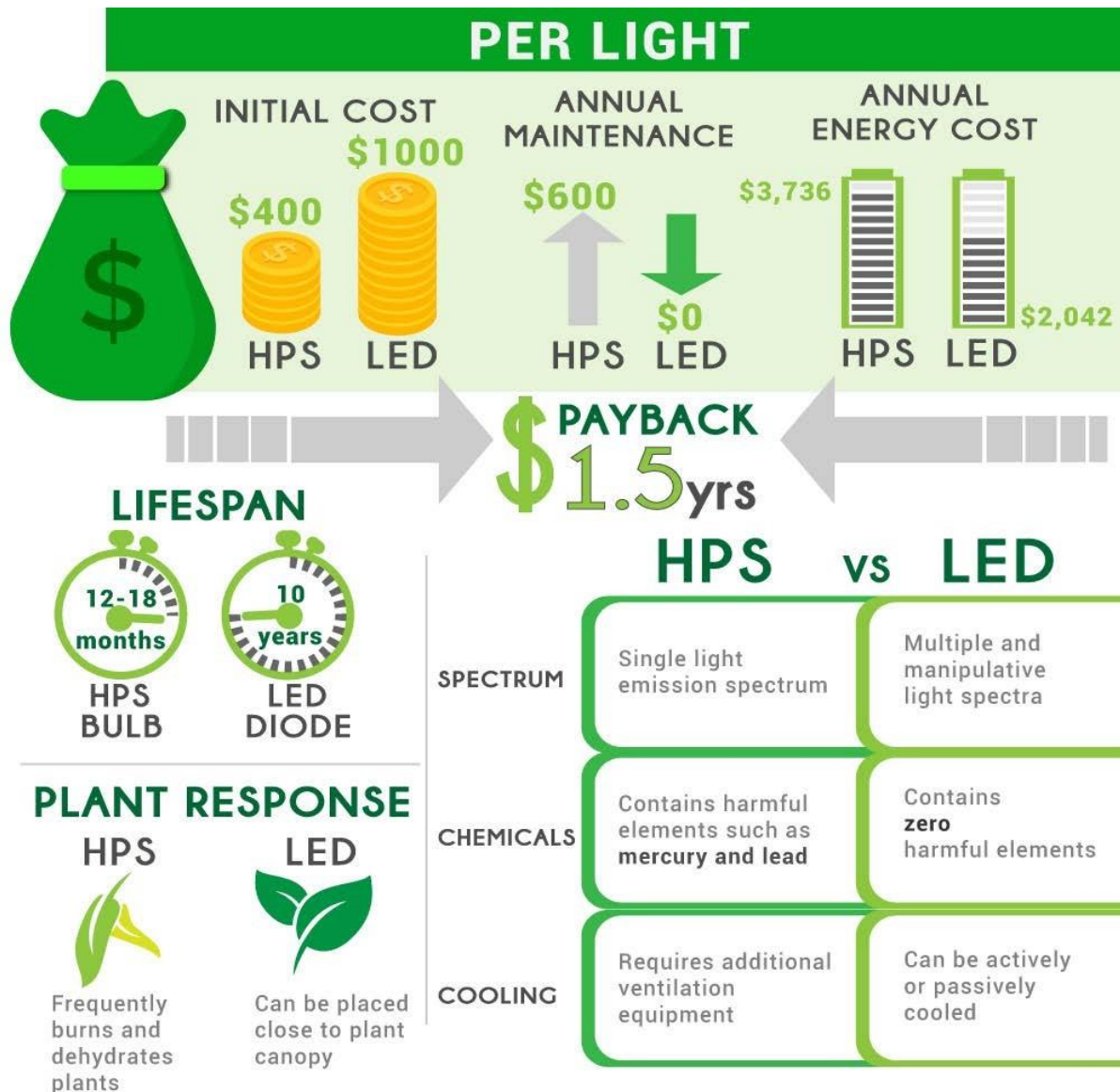
- « ASTREDHOR : Mise au point d'un système innovant de production de plantes horticoles (Irradiance) - Recherche et résultats / Programmes de recherche ». Consulté le 16 avril 2018. <https://www.astredhor.fr/mise-au-point-d-un-systeme-innovant-de-production-de-plantes-horticoles-irradiance-103780.html>.
- « ASTREDHOR : STEPP - L'Institut / Stations d'expérimentation ». Consulté le 3 juin 2018. <https://www.astredhor.fr/stepp-bretagne-1584.html>.

Annexes

Annexe I : Comparaison des coûts totaux et amortissements d'éclairage LED et HPS

LED vs HPS

While there are a number of HID solutions out there, HPS lights seem to be the chosen favorite of indoor farmers. These traditional solutions are not only costly and dangerous, but they also are notorious for their short lives and frequent outages. Let's compare LEDs and HPS lights side by side.



**All data and statistics are based on a USA national average. Results may vary.*

"Why choose LEDs", Illumitex.

RÉSUMÉ

Les problématiques de la production horticole se multiplient face à un monde qui se développe rapidement et fait évoluer les besoins des consommateurs. Aujourd'hui, la qualité des produits horticoles se caractérise, entre autres, par un port compact et touffu pourvu d'une floraison abondante. Ces critères se justifient d'autant plus que les populations deviennent de plus en plus urbaines, nécessitant une végétation adaptée à des espaces restreints. En parallèle, les producteurs désirent des cycles de production courts avec une bonne reprise des jeunes plants et une floraison hâtée en fonction des dates du marché. Afin de proposer des solutions durables aux professionnels, de nombreux acteurs de la filière comme l'équipe Arch'E de l'INRA-IRHS et la STEPP de l'ASTREDHOR s'engagent dans la recherche fondamentale et appliquée d'éclairages horticoles susceptibles d'améliorer la qualité des plantes avec le projet IRRADIANCE. La littérature publiée récemment sur ce sujet indique que l'éclairage avec LEDs est actuellement le plus performant et offre des résultats prometteurs en unique source de lumière dans un environnement contrôlé par rapport à une culture sous lumière naturelle en serre. Les résultats de l'essai préliminaire au projet IRRADIANCE effectué à la STEPP sur des jeunes pousses maraîchères ainsi que des jeunes plants de fleurs à massifs confirment le potentiel de la culture sous une source unique d'éclairage LED en environnement contrôlé. En effet, les semis placés sous lumière solaire en serre ou sous LEDs avec différents rapports Bleu/Rouge en environnement contrôlé présentent, une production plus rapide, compacte, enracinée et ramifiée sous LEDs. Ces effets sont notamment observés avec des quantités croissantes de bleu. Cependant, les réponses des végétaux aux variations de quantité (intensité) et de qualité (couleur) du spectre lumineux restent spécifiques, parfois même variétales, et peuvent parfois se traduire par une pigmentation fortuite. Il est donc nécessaire de poursuivre l'apprentissage sur ce sujet et de développer des essais diversifiés en termes d'éclairages et d'espèces végétales afin de préparer l'avenir de l'horticulture dans sa dimension urbaine.

mots-clés : agriculture urbaine, horticulture, LED, environnement contrôlé, jeune pousse, jeune plant, cycle court, compacité

ABSTRACT

Challenges in horticultural production are increasingly complex as societies adapt to an ever changing world and new consumer demand has to be addressed accordingly. Today, quality traits of horticultural products are characterized, among other things, by plant compactness and strong branching of plants as well as abundant flowering. These criteria are all the more so justified as the populations are becoming more and more urban, requiring a vegetation adapted to more restricted spaces. In parallel, producers are looking for short production cycles, good regrowth of the young plants and on-time flowering depending on anticipated commercialisation periods. In order to offer sustainable solutions to professionals, many service providers such as the Arch'E team from INRA-IRHS and the experiment station STEPP of the French Technical Institute ASTREDHOR invest into fundamental and applied research of horticultural lighting likely to improve the quality of plants within the IRRADIANCE project. Recently published literature indicate that LED lighting is currently the most efficient as a sole source lighting (SSL) and offers promising results in a controlled environment compared to cultures under ambient light (AL) conditions in a greenhouse. Preliminary tests as part of the IRRADIANCE project and realised at STEPP experiment station on microgreens and annual bedding plant seedlings confirmed the potential of SSL in indoor production systems. In fact, seedlings grown under SSL conditions in a controlled environment with different light spectres as compared to classical greenhouse conditions grow faster, are more compact, have better root systems and show better branching. These effects are observed especially with increasing amounts of blue light. However, the plants respond to variations in quantity (intensity) and quality (color) of the light spectrum. These responses are species specific, sometimes even varietal, and can sometimes result in fortuitous pigmentation. It is therefore necessary to continue studying this subject and to develop tests focussing on light quality and responses of different plant species in order to prepare the future of horticulture in its urban dimension.

keywords : urban agriculture, horticulture, LED, controlled environment, microgreens, annual bedding plant seedlings, short cycle, compactness